

AVALIAÇÃO DA SECAGEM DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

JORGE ALELUIA NUNES DA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Doutor João Manuel do Paço Quesado Delgado

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, Irmã e Namorada

“Fortes Razões Fazem Fortes Ações”

William Shakespeare

AGRADECIMENTOS

A realização do trabalho só foi possível com o contributo de algumas pessoas a quem dirijo agora os meus agradecimentos.

Gostaria de começar por manifestar o meu profundo agradecimento à minha orientadora, a Professora Eva Barreira, pela disponibilidade e preocupação demonstradas durante a execução deste projeto. Os seus conselhos e apoio foram imprescindíveis tanto para a realização dos ensaios, como para a redação do texto e revisão de todo o trabalho.

Agradeço vivamente ao Doutor João Delgado, o meu co-orientador, pela ajuda prestada durante os ensaios laboratoriais, na interpretação dos resultados dos mesmos, bem como pela revisão do trabalho final.

Ao LFC (Laboratório de Física de Construções), pela disponibilização dos equipamentos necessários.

Ao Engenheiro Pedro Pereira, pela ajuda e disponibilidade prestadas no manuseamento dos equipamentos.

À Engenheira Sara Freitas e demais colaboradores do Laboratório de Física das Construções pela disponibilidade e abertura do laboratório sempre que necessário.

Aos meus colegas que também se encontravam a trabalhar no LFC pela ajuda prestada e disponibilização de equipamentos pessoais.

Quero ainda agradecer à Sara, a minha namorada, por toda a sua paciência e incentivo dado para a realização deste trabalho, bem como pelo tempo despendido a rever o texto, na procura de eventuais inconformidades.

Por último, dirijo uma nota de gratidão à minha família, por todo o apoio prestado, principalmente aos meus pais, à minha irmã e à minha avó que sempre me mantiveram motivado e apoiaram durante este trabalho.

RESUMO

A absorção e secagem de água nos materiais de construção podem condicionar a durabilidade, qualidade e aspeto dos edifícios.

Este trabalho incidiu sobre a secagem de materiais de construção porosos (tijolo cerâmico e betão celular). Foram descritas sinteticamente as diferentes fases de secagem para os materiais porosos, assim como alguns modelos teóricos, e mecanismos de movimento da água, no estado líquido e no estado vapor.

Para o estudo da cinética de secagem foram feitos ensaios laboratoriais usando cinco amostras de Tijolo cerâmico, e duas amostras de Betão celular. Estas amostras foram secas em condições constantes de temperatura e humidade relativa, sendo os valores registados de 5 em 5 minutos. Através dos valores provenientes dos ensaios foi possível distinguir as diferentes fases de secagem dos materiais porosos ensaiados.

Para a análise dos resultados foram escolhidos seis modelos da cinética de secagem referenciados na literatura. Determinou-se qual dos modelos melhor se ajustava aos resultados experimentais obtidos, para os materiais em estudo, através da percentagem de erro entre os valores experimentais e os valores teóricos respetivos a cada modelo. O modelo de Hii *et al* foi o que obteve valores teóricos mais aproximados dos valores experimentais, com a média do erro mais baixa. Embora o modelo de Hii *et al* verificasse os valores mais baixos de erro, constatou-se que o erro proveniente do modelo de Midilli *et al* era muito próximo, e, visto que este modelo utiliza menos uma constante para o cálculo, optou-se pelo modelo de Midilli *et al*. Através da constante de secagem, k , deste modelo, determinou-se o tempo de secagem t_c , e analisou-se a influência da temperatura e da humidade relativa no tempo de secagem. O erro apresentado pelo modelo Logarítmico também foi relativamente pequeno comparativamente com os outros modelos utilizados. Embora o modelo Logarítmico apresente uma boa precisão relativamente aos outros modelos que foram rejeitados, se compararmos o seu erro com o dos modelos de Midilli *et al* e de Hii *et al* a diferença ainda é bastante grande. Pelo exposto, embora o modelo Logarítmico possua menos uma constante do que o modelo de Midilli *et al*, entendeu-se não considerar este modelo.

Foi feita uma comparação da secagem de uma amostra de betão celular impermeabilizada, com uma amostra de betão celular não impermeabilizada e com uma amostra de tijolo cerâmico, em condições de temperatura e humidade relativa constantes. O tijolo cerâmico ao fim de 47h a secar apresentou 18% do valor de água inicial, o betão celular 32%, e o betão celular impermeabilizado 66%. Ao fim de 140h de secagem o betão celular impermeabilizado apresentava 43% da água absorvida, enquanto que o betão celular não impermeabilizado apresentava 10%. Calculou-se a energia de ativação de Arrhenius para os valores extremos de humidade relativa ensaiados, 50% e 80%.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem, Cinética de secagem, Ensaios laboratoriais, Betão celular, Tijolo cerâmico.

ABSTRACT

Water absorption and drying in building materials, pose a threat to the durability, quality, and appearance of buildings.

This work was focused on drying of porous building materials (ceramic brick, aerated concrete). Were briefly described the different stages of drying in porous materials, as well as, theoretical models and mechanisms of water movement in the liquid state and the vapor state.

To study the drying kinetics, were made fourteen laboratory essays using five samples of ceramic bricks and two samples of cellular concrete. These samples were dried at constant conditions of temperature and relative humidity, being the values of weight recorded in intervals of five minutes. Through the values from essays was possible to distinguish the different stages of drying in porous materials.

In order to do the analysis of the results, six models of drying kinetics were selected from the models found in the literature. Afterwards, was chosen the model which provided the best fit to the experimental results obtained, for the materials under study, using the percentage error between experimental and theoretical values for each respective model.

The model Hii et al was the one that gave the best fit to the experimental values, this had the lower average error. Although the model Hii et al gave lower values of error, it was found that the error from the Midilli et al model was similar, and since this model uses one less constant for the calculation, the Midilli et al model was choosen. Using the drying constant, k , of this model, the drying time, t_c , was determined, and the influence of temperature and relative humidity in the drying time was analyzed. The error that resulted from the use of the logarithmic model was also relatively small compared to the other models used. Although the logarithmic model has had a good accuracy comparing with the other models that were rejected, if we compare his error with the ones from the models Midilli et al and Hii et al, the gap is still quite large. From the foregoing, although the logarithmic model had one less constant than the Midilli et al model, it was understood not to consider this model.

It was made a comparison between the drying of a sample of aerated concrete waterproofed, a sample of aerated concrete, and a sample of ceramic brick, under conditions of temperature and relative humidity constants. The ceramic brick after drying during 47h had 18% of the initial water, aerated concrete had 32%, and the waterproof aerated concrete 66%. After drying 140h waterproof aerated concrete still had 43% of the initial water, while the aerated concrete had 10%

The Arrhenius activation energy was calculated for the extreme values of relative humidity tested, 50% and 80%.

PALAVRAS-CHAVE: Drying, Drying kinetics, Laboratory essays, Aerated concrete, Ceramic brick

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO	2
 2. SECAGEM	 5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. PROCESSO DE SECAGEM DOS MATERIAIS POROSOS	6
2.2.1. MATERIAIS POROSOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	6
2.2.2. FASES DE SECAGEM DOS MATERIAIS POROSOS	7
2.2.3. CURVAS DE SECAGEM	8
2.2.4. TRANSPORTE DE ÁGUA NOS MATERIAIS POROSOS	9
2.2.5. MODELOS TEÓRICOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE EM MEIOS POROSOS	17
2.3. CINÉTICA DE SECAGEM	21
2.3.1. INTRODUÇÃO À CINÉTICA DE SECAGEM	21
2.3.2. CONSTANTE DE SECAGEM K	23
2.3.3. MODELOS DE SECAGEM DE PRIMEIRA ORDEM E CONSTANTE DO TEMPO DE SECAGEM	24
2.3.4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM, RAZÃO DA HUMIDADE MR	27
2.3.5. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ESCOLHA DO MODELO DE SECAGEM QUE MELHOR DEFINE A CURVA DE SECAGEM	29
2.3.6. MODELOS DA CINÉTICA DE SECAGEM	30
2.3.7. DIFUSIVIDADE EFETIVA DO VAPOR DE ÁGUA E ENERGIA DE ATIVAÇÃO	33
 3. ENSAIOS LABORATORIAIS	 37
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	37
3.2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS	37

3.2.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	44
3.2.3. PROCEDIMENTO LABORATORIAL	45
3.3. RESULTADOS	47
3.3.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	47
3.3.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	48
 4. ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM	 55
4.1. CORRELAÇÃO ENTRE OS MODELOS DA CINÉTICA E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
4.2. COMPARAÇÃO DOS DOIS MATERIAIS ANALISADOS	66
4.3. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO DE ARRHENIUS	67
 5. CONCLUSÕES	 70
5.1. CONCLUSÕES FINAIS	70
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	70
 BIBLIOGRAFIA.....	 72

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Teores de humidade de referência [1].....	5
Fig.2.2 – Fases de secagem de materiais porosos [10]	8
Fig.2.3 – Variação do fluxo de secagem nas diferentes fases de secagem.....	8
Fig.2.4 – Curva de secagem [10]	9
Fig.2.5 – Fenómeno de Adsorção [12].....	10
Fig.2.6 – Mecanismos de Capilaridade [12].....	12
Fig.2.7 – Variação da sucção capilar com o teor de água.....	13
Fig.2.8 – Pressão Capilar dentro de um poro capilar [4]	13
Fig.2.9 – Sucção capilar do betão celular em função do teor de humidade [2].	14
Fig.2.10 – Zona de Condensação interna [12].....	15
Fig.2.11 – Diagrama Psicométrico	17
Fig.2.12 – Histerese entre isotermas de absorção e desabsorção [21]	26
Fig.3.1 – Painel de controlo da câmara climática	38
Fig.3.2 – Câmara climática.....	39
Fig.3.3 – Balança sartorius utilizada nos ensaios	39
Fig.3.4 – Coeficiente de Difusividade Higrotérmica (Dt) do betão celular [2]	40
Fig.3.5 – Coeficiente de Difusividade Hídrica (Dw) do betão celular [2].....	41
Fig.3.6 – Coeficiente de Difusividade Higrotérmica (Dt) do barro vermelho [2].....	42
Fig.3.7 – Coeficiente de Difusividade Hídrica (Dw) do barro vermelho [2]	44
Fig.3.8 – Provete de betão celular impermeabilizado	44
Fig.3.9 – Estabilização do provete na câmara climática	45
Fig.3.10 – Registo contínuo dos pesos em folha de Excel	46
Fig.3.11 – Imersão em água de uma amostra de tijolo.....	46
Fig.3.12 – Curva de secagem T-25 HR-50 tijolo cerâmico	49
Fig.3.13 – Curva de secagem T-30 HR-50 tijolo cerâmico	50
Fig.3.14 – Curva de secagem T-20 HR-80 tijolo cerâmico	50
Fig.3.15 – Curva de secagem T-25 HR-50 betão celular	50
Fig.3.16 – Curva de secagem T-25 HR-50 betão celular impermeabilizado	51
Fig.3.17 – Fluxo de secagem T-30 HR-50 tijolo cerâmico.....	52
Fig.3.18 – Fluxo de secagem T-15 HR-65 tijolo cerâmico.....	52
Fig.3.19 – Fluxo de secagem T-25 HR-65 tijolo cerâmico.....	53

Fig.3.20 – Fluxo de secagem T-25 HR-80 tijolo cerâmico	53
Fig.3.21 – Fluxo de secagem T-25 HR-50 betão celular	54
Fig.3.22 – Fluxo de secagem T-25 HR-50 tijolo cerâmico	54
Fig.4.1 – Curva experimental e teórica do ensaio 1	58
Fig.4.2 – Curva experimental e teórica do ensaio 2	58
Fig.4.3 – Curva experimental e teórica do ensaio 7	59
Fig.4.4 – Curva experimental e teórica do ensaio 8	59
Fig.4.5 – Curva experimental e teórica do ensaio 9	60
Fig.4.6 – Curva experimental e teórica do ensaio 10	60
Fig.4.7 – Curva experimental e teórica do ensaio 3	61
Fig.4.8 – Curva experimental e teórica do ensaio 4	61
Fig.4.9 – Curva experimental e teórica do ensaio 5	62
Fig.4.10 – Curva experimental e teórica do ensaio 6	62
Fig.4.11 – Curva experimental e teórica do ensaio 13	63
Fig.4.12 – Curva experimental e teórica do ensaio 11	63
Fig.4.13 – Curva experimental e teórica do ensaio 12	64
Fig.4.14 – Curva experimental e teórica do ensaio 14	64
Fig.4.15 – Curvas de secagem dos materiais estudados	66
Fig.4.16 – Representação gráfica da taxa de secagem em função da temperatura de secagem, para HR=50%	68
Fig.4.17 – Representação gráfica da taxa de secagem em função da temperatura de secagem, para HR=80%	68

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 2.1 – Efeito de vários fatores na constante de secagem para vários materiais [21]	24
Tabela 3.1 – Massa Volúmica do betão celular [2]	40
Tabela 3.2 – Coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de humidade para o betão celular [34].....	41
Tabela 3.3 – Massa Volúmica do barro vermelho [2].....	42
Tabela 3.4 – Coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de humidade para o tijolo cerâmico [34].....	43
Tabela 3.5 – Descrição das amostras de tijolo	45
Tabela 3.6 – Descrição das condições dos ensaios	47
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de secagem	48
Tabela 4.1 – Erro dos modelos estudados	57
Tabela 4.2 – Constante de secagem K e tempo de secagem t_c do modelo Midilli <i>et al.</i>	65

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A_0	– Constante de Arrhenius [m^2/s]
A	– área da seção reta do meio poroso [m^2]
a_{wr}	– atividade da água de referência
a_w	– atividade da água
a, b, c, n	– constantes empíricas do modelo de secagem
c_w	– concentração de vapor de água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
C_s	– concentração de vapor de água à superfície [kg/m^3]
C_a	– concentração de vapor de água na ambiência [kg/m^3]
d	– diâmetro dos poros [m]
$\frac{dM}{dt}$	– taxa de secagem
D_t	– coeficiente de difusividade higrótérmica ($\text{m}^2/\text{s} \cdot \text{K}$)
D_w	– coeficiente de difusividade hídrica (m^2/s)
D_{eff}	– Coeficiente de difusividade efetiva [m^2/s]
E_a	– Energia de ativação [kJ/mol]
$f(w)$	– teor de água do provete em função do tempo [%]
F_w	– fluxo de humidade [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
g	– Aceleração da gravidade [m/s^2]
g_v	– fluxo de vapor [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
g_l	– fluxo de água líquida [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
\vec{j}_w	– fluxo de difusão do vapor ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
k	– coeficiente empírico do modelo de secagem [h^{-1}]
K_l	– permeabilidade absoluta ao líquido [s]
k_1	– constante que descreve a taxa de secagem associada ao modelo de Peleg [h]
k_2	– constante de capacitância do modelo de Peleg [-]
l	– Espessura da laje [m]
L	– comprimento do meio poroso [m]
M	– teor de humidade no material [kg/kg]
M_e	– teor de humidade de equilíbrio [kg/kg]
M_i	– teor de humidade inicial no material [kg/kg]
M^*	– valor teórico da humidade contido no material [kg/kg]
MR	– razão da humidade durante a secagem [-]

M_i – teor de humidade inicial no material [kg/kg]
 $MR_{teo, i}$ – Razão da humidade teórica prevista i [-]
 $MR_{exp, i}$ – Razão da humidade experimental i [-]
 N – número de observações [-]
 n – número de constantes [-]
 p – número de parâmetros estimados [-]
 p_v – pressão de vapor [Pa]
 p_s – pressão de saturação [Pa]
 ρ_l – Massa volúmica da água [kg/m³]
 P_c – Pressão capilar [Pa]
 P_{ar} – Pressão do ar [Pa]
 p_c – pressão capilar [Pa]
 ρ_o – massa volúmica do material seco [kg/m³]
 $P_{água}$ – Pressão da água [Pa]
 ΔP – diferença de pressão aplicada na amostra [Pa]
 R – Constante universal dos gases ideais [kJ/mol K]
 r – Raio capilar [m]
 R_1/R_2 – Raios de curvatura [m]
 R_{si} – Resistência superficial interior [m².°C/W]
 T – Temperatura [°C]
 t – tempo [h]
 t_i – tempo total do ensaio [h]
 t_c – tempo de secagem [h]
 T_r – Temperatura de referência [°C]
 U – Coeficiente de transmissão térmica [W/m².°C]
 u_a – Velocidade do ar [m/s]
 u_r – velocidade do ar de referência [m/s]
 W_0 – teor de água inicial [%]
 W – quantidade de água (kg/m³)
 X – Massa da amostra em função do tempo [kg]
 X_e – Massa de equilíbrio da amostra [kg]
 X_i – Massa inicial da amostra [kg]
 x – espessura [m]

$x(t)$ – avanço da água no capilar, em função do tempo [m]

Θ_{si} – Temperatura superficial interior [°C]

Θ_i – Temperatura interior [°C]

Θ_e – Temperatura exterior [°C]

Θ – ângulo de molhagem [°]

Ψ – Sucção capilar [m H₂O]

μ – viscosidade do fluido [kg/m.s]

σ – tensão capilar [N/m]

π – permeabilidade ao vapor [kg/m.s.Pa]

δ – permeabilidade ao vapor de água (kg/msPa)

β – coeficiente de transferência superficial de humidade [m/s²]

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fig. – Figura

LFC – Laboratório de Física das Construções

MR – Moisture Ratio

MBE – Mean Bias Error

PE – Percent Errors

RMSE – Root Mean Square Errors

R^2 – Regression coefficient

SSE – Sum Square Errors

χ^2 – chi-Square

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na construção civil a humidade é causa de variadas patologias que afetam a durabilidade e a qualidade das construções e espaços interiores. A humidade não só degrada esteticamente, como também altera as características e comportamento dos materiais, sendo principalmente afetadas as suas propriedades térmicas.

Visto que a grande maioria dos materiais de construção utilizados são materiais porosos, verifica-se que há acumulação de água nos seus espaços vazios. A sua porosidade leva a que ocorra movimentação de água no seu interior por meio de fenómenos físicos. É através da absorção de água, do fluxo de calor, e principalmente da secagem que há uma maior degradação dos materiais.

A secagem é um fenómeno de transferência de humidade, na forma líquida ou de vapor, do interior do material para o meio ambiente. É necessário, para que a secagem ocorra, que exista a energia suficiente para remover o vapor de água do material ou para evaporar a água que se encontra no estado líquido e, posteriormente, removê-la do interior do material poroso para o ambiente.

O estudo do processo de secagem, para materiais de construção porosos, tem vindo a ganhar relevo devido à sua importância para a durabilidade das construções e sua manutenção. Desta forma, a cinética de secagem comumente utilizada na indústria alimentar, começa a ser usada com maior frequência para materiais de construção. Os modelos da cinética de secagem permitem descrever o processo de secagem de materiais.

Este trabalho consistiu na execução da secagem de amostras de betão celular e tijolo sólido numa câmara climática, em condições de temperatura e humidade relativa pré-definidas. Posteriormente à secagem foi feito um estudo da cinética de secagem, recorrendo a modelos existentes na literatura. Estabeleceu-se uma relação entre os resultados experimentais da secagem e as curvas dos modelos usados. Por fim fez-se a escolha do modelo que melhor descreve a secagem dos materiais estudados.

1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do trabalho desenvolvido foi, através da cinética de secagem, prever o comportamento do material durante o processo de secagem, a temperatura e humidade relativa constantes. Estabeleceu-se uma relação entre os dados experimentais da secagem e as curvas dos modelos e posteriormente foi feita a escolha do modelo que melhor se ajustava aos dados experimentais. Os materiais porosos

ensaiados foram o betão celular e o tijolo sólido. De forma a ser possível cumprir o objetivo principal, foi necessário:

- Compreender os efeitos dos ciclos molhagem/secagem no desempenho e aparência de materiais de construção.
- Compreender o processo de secagem dos materiais porosos, nomeadamente as diferentes fases de secagem
- Pesquisar os diferentes modelos da cinética de secagem existentes na literatura, fazendo posteriormente uma seleção dos modelos a testar.
- Comparação entre os valores experimentais e os modelos da cinética de secagem de forma a encontrar o modelo que melhor se adequa aos materiais.
- Conceção das curvas de fluxo de secagem com os dados experimentais e posterior análise da influência dos fatores de humidade relativa e temperatura no tempo de secagem dos dois materiais porosos estudados.
- Análise da influência da temperatura no processo de secagem, por forma a determinar a energia de ativação de Arrhenius, pela equação de Peleg.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em 5 capítulos. Os conteúdos abordados em cada capítulo foram os seguintes:

- Capítulo 1: É feita, neste capítulo, uma introdução dos assuntos tratados neste trabalho, bem como uma breve descrição do procedimento do mesmo. Faz-se o enquadramento deste trabalho na área da cinética de secagem para materiais de construção porosos. São ainda apresentados o interesse e objetivos.
- Capítulo 2: O capítulo de secagem é um capítulo teórico que tem como objetivo descrever os aspetos mais relevantes do fenómeno da secagem para este trabalho. Faz-se, entre outras, a descrição das diferentes fases de secagem de materiais porosos, a descrição do transporte de água e uma introdução à cinética de secagem.
- Capítulo 3: Este capítulo descreve os procedimentos laboratoriais a adotar para a realização dos ensaios, bem como os materiais e equipamentos utilizados. É feita ainda uma breve descrição das amostras utilizadas. São também apresentados os resultados dos ensaios e as curvas de fluxo de secagem. Por fim faz-se um breve comentário aos resultados obtidos.
- Capítulo 4: Foi feita a análise dos resultados através de alguns modelos da cinética de secagem selecionados da literatura. Através do parâmetro de erro foi escolhido o modelo que melhor se ajustava aos valores experimentais da secagem. Foi ainda realizado um estudo da influência da temperatura no processo de secagem, por forma determinar a energia de ativação de Arrhenius, pela equação de Peleg.

- Capítulo 5: Neste capítulo sintetizam-se os resultados obtidos. Apresentam-se as principais conclusões e sugestões para estudos futuros realizados no âmbito da cinética de secagem para materiais de construção.

2

SECAGEM

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo descreve-se o processo de secagem dos materiais porosos. Estes materiais contêm pequenos vazios na sua estrutura (poros), que se podem encontrar ocupados por ar, água ou vapor de água. Podem ainda encontrar-se interligados ou ser separados pelo material. No primeiro caso diz-se que têm porosidade aberta, no caso dos seus poros serem isolados diz-se que têm porosidade fechada. Em materiais com porosidade aberta o transporte de água no seu interior é facilitado. Todos os materiais de porosidade aberta têm um teor de humidade compreendido entre zero kg/m^3 e o máximo, embora o máximo seja difícil de atingir pois exige que o material fique sob pressão durante a humedificação. Há outros teores de humidade de referência, entre esses dois extremos, que podem ser referidos, tais como (Fig. 2.1) [1] :

- Teor de humidade higroscópico – W_h é a humidade que o material possui quando em contato com um ambiente com um determinado valor de humidade relativa.
- Teor de humidade crítico - W_{cr} define o limite abaixo do qual o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível.
- Teor de humidade de saturação – W_{sat} , corresponde à humidade que um material contém estando em contato com água.

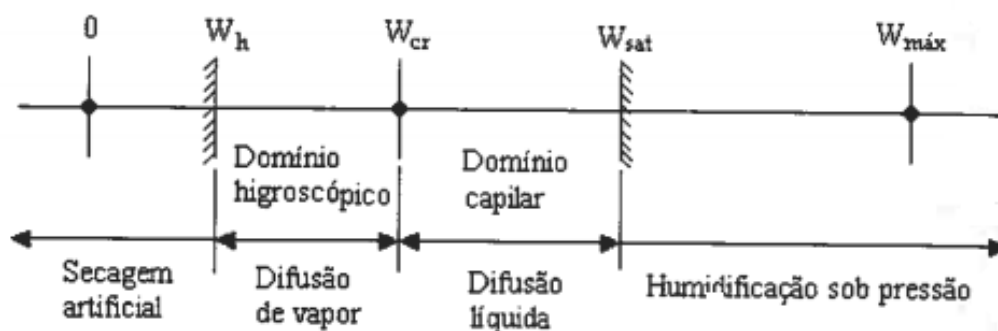


Fig.2.1 – Teores de humidade de referência [1].

Os poros classificam-se ainda consoante o seu tamanho, sendo os microporos os mais pequenos, que não têm influência no transporte de água, seguindo-se os mesoporos, pelos quais é feito o transporte de água líquida, e por fim os maiores são os macroporos que têm influência na migração do vapor de água. Ao longo deste capítulo, abordar-se-á a descrição do movimento de água líquida e da transferência do vapor de água nos materiais porosos, definindo-se os parâmetros que condicionam o transporte de humidade.

Para além disso, serão referidos outros trabalhos desenvolvidos sobre a secagem, principalmente trabalhos que abordam o processo de secagem dos materiais porosos e os modelos da cinética de secagem.

2.2. PROCESSO DE SECAGEM DOS MATERIAIS POROSOS

2.2.1 MATERIAIS POROSOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em Engenharia Civil utilizam-se frequentemente materiais porosos com comportamento higroscópico para revestimento das paredes exteriores, isto é, quando são colocados numa ambiência em que a humidade relativa varia, o seu teor de humidade também varia [2]. A humidade relativa é definida para uma dada temperatura como sendo o quociente entre a pressão de vapor existente e a pressão de saturação, $HR=P_v/P_{vs}$. Em locais onde a humidade relativa é elevada há uma maior dificuldade na secagem, enquanto que locais onde a humidade relativa é baixa proporcionam uma secagem mais rápida. As paredes estão sujeitas a ações várias devido à sua exposição aos agentes atmosféricos tal como o vento, chuva, as amplitudes térmicas e o sol. De forma a proporcionar aos utilizadores dos edifícios as condições ideais de conforto com um ambiente interno ideal à sua habitabilidade, devem ser prevenidos os efeitos desses fatores externos sobre as mesmas que afetam a durabilidade e o desempenho das construções. Um bom ambiente interior deve possibilitar conforto térmico, visual e acústico consoante a função da divisão [3].

Zhong [3] refere que em Iowa foi descoberto que a maioria das habitações sofre de problemas relacionados com a humidade, tendo sido efetuado um inquérito em que, de 334 residências no Iowa, 98% dos residentes se queixaram de um dos tipos de problema relacionados com a humidade.

A absorção de água pelos materiais utilizados na construção vai alterar o seu desempenho térmico, a estética, o comportamento mecânico e a sua durabilidade. A durabilidade é afetada por reações químicas e possíveis cristalizações de sais consoante as substâncias dissolvidas na água. Os materiais são afetados esteticamente, principalmente devido a desenvolvimentos biológicos. Apesar de não provocar qualquer alteração no desempenho térmico e mecânico do sistema, o desenvolvimento biológico tem um grande impacto visual, causando o desagrado dos utilizadores [4]. Define-se secagem como um processo de transferência de calor e massa entre o objeto a secar e o meio envolvente, que geralmente é o ar. Neste processo, aplicando uma determinada quantidade de energia a um corpo que tem um solvente, vai levar a que este seja expulso do corpo, evaporando-se e saindo posteriormente para o meio envolvente. O calor pode ser proveniente de uma fonte externa por convecção, condução, radiação ou pode ser gerado internamente por meios de resistência elétrica [5]. Em materiais de construção, na generalidade, a secagem é natural, exposta ao meio exterior, até que se atinja um equilíbrio entre a humidade presente no material e a humidade relativa do ambiente em que este se encontra. O estudo da transferência de humidade no interior de materiais e elementos de construção reveste-se da maior importância para a caracterização do seu comportamento, no que se refere à durabilidade, à estanquidade, à degradação de aspeto e desempenho térmico desses mesmo materiais e elementos de construção [2]. Depois de se estabelecer o equilíbrio entre a humidade

presente no material e a humidade relativa do ambiente em que este se encontra, para se obter uma maior secagem terá que se recorrer a processos artificiais como secagem em estufa, vácuo ou centrifugação. Segundo Sousa [6] em física das construções, um material é considerado seco, quando durante um espaço de tempo pré-definido, a sua massa não varia significativamente, para determinadas condições de temperatura e humidade relativa.

2.2.2 FASES DE SECAGEM DOS MATERIAIS POROSOS

Bednar [7] e Belleghem [8] referem três períodos de secagem para materiais porosos. Num primeiro período, o material adapta-se às condições do ambiente: a temperatura do material reduz-se até que a perda de calor devido à evaporação e o ganho de calor se igualem. Quando se estabelecer o equilíbrio entre o calor a sair e o calor que é recebido entra-se no segundo período, no qual, a temperatura e o fluxo de secagem do material são constantes e a transferência de humidade do interior do material é igual à humidade que sai para a ambiência. No terceiro e último período o fluxo de secagem decresce, o objeto começa a ficar seco e a secagem é condicionada pela quantidade de humidade que provém do interior do objeto para a superfície. Neste período, a temperatura do material começa a aumentar.

De acordo com Krischer e Kroell [9] três fases no processo de secagem para materiais porosos quando este é saturado e colocado num ambiente com temperatura e humidade relativa pré-definidas (Fig. 2.2 e 2.3).

Na primeira fase o fluxo de secagem é constante. Nesta etapa o transporte de água líquida, contida no corpo saturado, faz-se do interior para a superfície do material por forças capilares. A quantidade de água transportada para a superfície do corpo é superior à quantidade de água na forma de vapor que o material liberta por evaporação. Durante esta fase a quantidade de água evaporada é aproximadamente constante e a velocidade de secagem depende unicamente das condições externas em que se encontra a ambiência, pelo que as características dos materiais não têm influência.

A segunda fase inicia-se quando a quantidade de água transportada para a superfície do corpo é inferior à quantidade de água na forma de vapor que o material liberta por evaporação. Durante esta fase o transporte de água líquida do interior do material para a sua superfície vai-se reduzindo progressivamente, embora se mantenham as condições de difusão entre a superfície do corpo e a ambiência. O fluxo de secagem diminui progressivamente, passando a evaporação a produzir-se não à superfície do material mas no seu interior. A posição da frente húmida é determinada pelo facto da quantidade de água líquida transportada por capilaridade até este nível ser de seguida conduzida até à superfície do corpo, por difusão de vapor, através de uma camada de material seco cada vez mais espessa. Para calcular o deslocamento da frente húmida no interior do material é necessário conhecer o coeficiente de difusividade hídrica do material e respetiva evolução, que é função do teor de humidade. Durante esta fase do processo de secagem, uma parte do material a secar encontra-se no domínio higroscópico, enquanto que a outra parte se encontra no domínio capilar. Quando se atingir em todo o material o teor de humidade inferior ao teor de humidade crítico, isto é, quando o material apresentar um comportamento higroscópico, inicia-se uma terceira fase no processo de secagem.

Esta última etapa é controlada apenas pela difusão do vapor, sendo caracterizada por um fluxo de secagem que diminui lentamente até atingir o teor de água de equilíbrio higroscópico. O valor zero só poderá ser atingido caso o material seja seco em estufa [10].

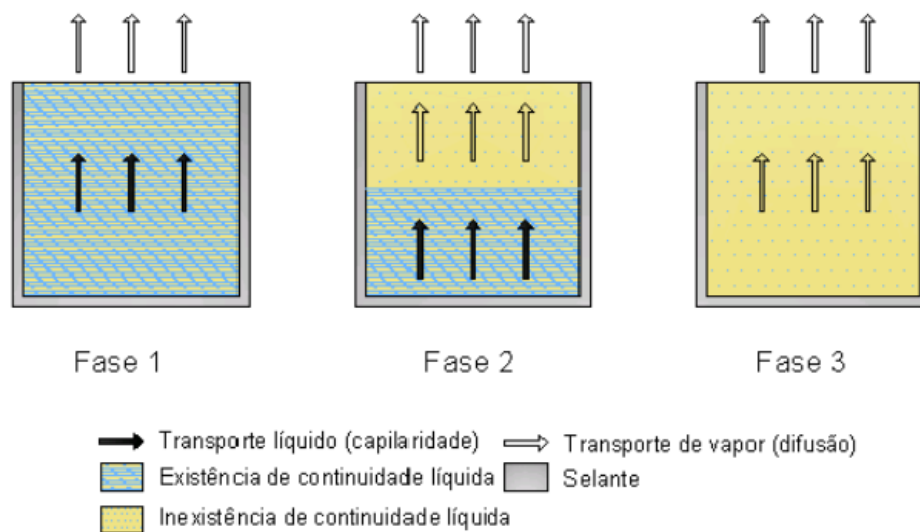


Fig.2.2 – Fases de secagem de materiais porosos [11].

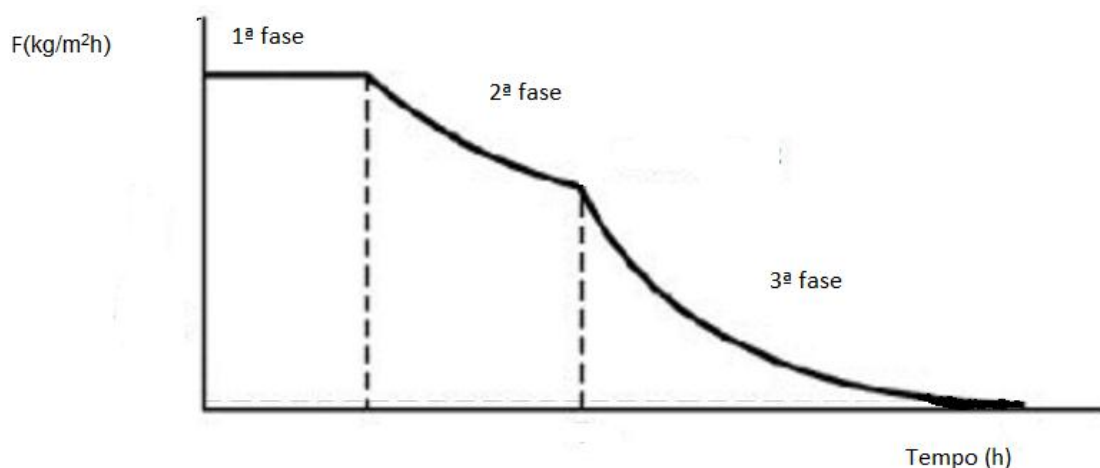


Fig.2.3 – Variação do fluxo de secagem nas diferentes fases de secagem.

2.2.3 CURVAS DE SECAGEM

O processo de secagem depende de fatores internos e externos, tal como a temperatura, humidade relativa, o teor de água crítica do material e as propriedades de transporte de água na fase líquida e de vapor. Na prática pode-se analisar a secagem dos materiais em condições pré-definidas, com recurso a curvas de secagem, conseguindo desta forma identificar as diferentes fases de secagem atrás referidas.

A curva de secagem expressa o teor de água da amostra, dado em percentagem ponderal da massa seca, em função do tempo, correspondendo o fluxo de secagem ao declive da curva (Fig. 2.4). No gráfico da Fig. 2.3 estão explicitas as três fases de secagem. A primeira fase corresponde ao troço reto, que traduz uma diminuição linear do teor de água, na qual o fluxo de secagem é aproximadamente constante. O ponto de inflexão da curva, definido no gráfico como teor de água crítica, corresponde à transição entre a primeira e a segunda fase, em que o fluxo de secagem passa a ser decrescente. Já a transição entre a segunda e terceira fase é normalmente indefinida, sendo que na terceira fase o fluxo

de secagem é muito próximo de zero. Na terceira fase da secagem (domínio higroscópico), a taxa de secagem decresce muito lentamente até ao equilíbrio.

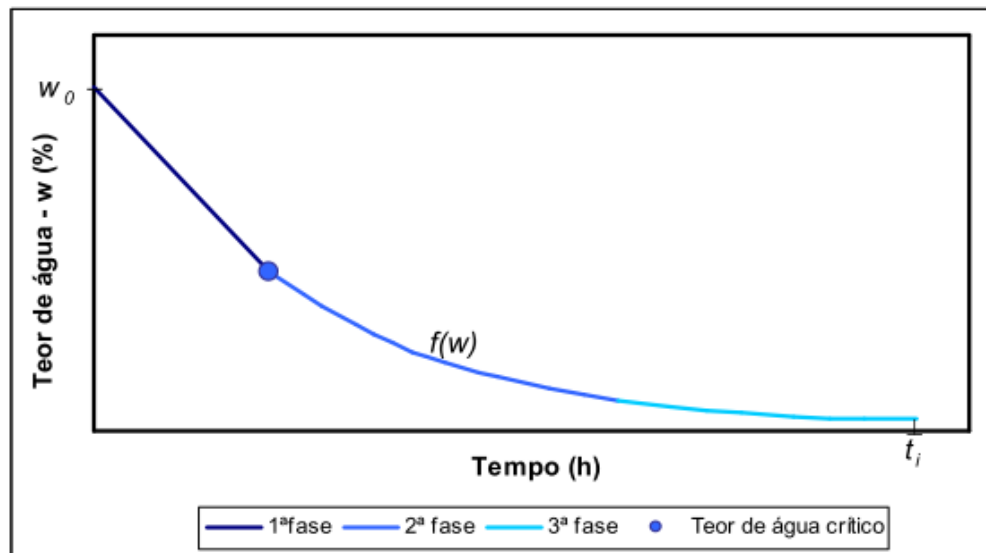


Fig.2.4 – Curva de secagem [11].

A forma das curvas de secagem são afetadas por vários fatores como as propriedades do material, as condições de secagem, etc. No primeiro troço, em que a diminuição do teor de água se dá segundo uma reta, a secagem depende maioritariamente dos fatores externos visto que, a água que evapora do material nessa fase já se encontrava à superfície. Embora as condições ambientais tenham um grande relevo na secagem do material, esta também é afetada por características do material, como a sua porosidade e rugosidade superficial que conduz a uma superfície efetiva de evaporação diferente, podendo consequentemente refletir-se em diferentes fluxos de secagem. Através do cálculo do índice de secagem podemos expressar os resultados do ensaio de secagem de uma forma quantitativa:

$$I. S. = \frac{\int_{t_0}^{t_i} f(w) \times dt}{w_0 \times t_i} \quad (2.1)$$

em que:

$f(w)$ – teor de água do provete em função do tempo [%]

w_0 – teor de água inicial [%]

t_i – tempo total do ensaio [h]

2.2.4 TRANSPORTE DE ÁGUA NOS MATERIAIS POROSOS

A transferência de humidade no estado de vapor em materiais porosos é realizada por difusão e convecção. O transporte de humidade no estado líquido é feito através da capilaridade, gravidade e

pelo efeito do gradiente de pressão. Os processos de transporte de vapor de água e de água líquida são feitos em simultâneo, dependendo das condições exteriores.

A humidade penetra nas construções no estado líquido e no estado gasoso, mas apenas sai no estado gasoso [12]. O transporte de humidade em materiais porosos pode ser explicado atendendo a três mecanismos físicos: adsorção/desadsorção, condensação e capilaridade.

2.2.4.1 Higroscopicidade ou adsorção/desadsorção

A higroscopicidade ou adsorção/desadsorção trata-se da troca de humidade relativa entre o material e a ambiência até que se atinja o equilíbrio e assim uma igualdade da pressão parcial de vapor. O processo de fixação de humidade relativa do ambiente designa-se por “adsorção” e é devido às forças intermoleculares ou de Van der Waals, que atuam na interface sólido-fluido, no interior dos poros, isto é, são forças de ligação de origem molecular e eletrostáticas que se manifestam entre as superfícies interiores dos poros e as moléculas de água [1].

Na primeira fase, há uma fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros (adsorção monomolecular), ocorrendo, numa segunda fase, uma deposição de várias camadas de moléculas de água (adsorção plurimolecular). Quando o diâmetro dos poros é reduzido, da ordem dos 2 a 20 n.m. ($1 \text{ n.m.} = 10^{-9} \text{ m}$), e as camadas de moléculas de água entram em contato, ocorre a condensação capilar (Fig. 2.5), sendo este fenómeno descrito na teoria de Kelvin [13].

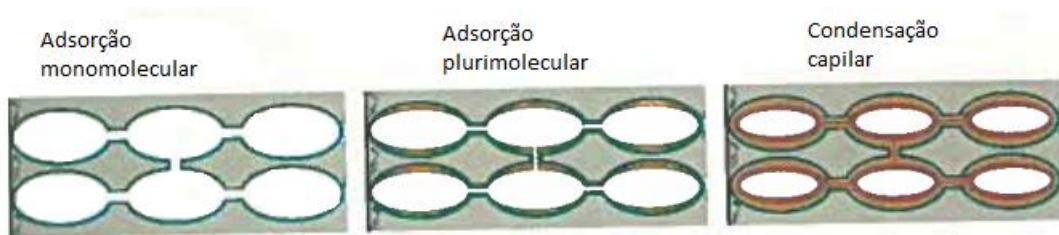


Fig.2.5 – Fenómeno de adsorção [13].

2.2.4.2 Capilaridade

A capilaridade trata-se da capacidade que um líquido tem de percorrer espaços apertados sem auxílio de forças externas como a gravidade. Este fenómeno deve-se a uma propriedade dos fluídos denominada tensão superficial. As partículas ou moléculas de um líquido exercem forças de atração, designando-se esta força de atração entre moléculas do mesmo material por coesão. Uma molécula que se encontra no interior do líquido é igualmente atraída em todas as direções, daí que as forças de coesão estão em equilíbrio. Quando a água se encontra num tubo, como no caso da Fig. 2.8, em que a superfície só se encontra em contacto com outras moléculas de líquido por baixo, as forças de coesão não são equilibradas ficando a superfície tensionada. Designa-se por adesão a atração entre as moléculas de um líquido e de um outro material. No caso de existir água num tubo, as moléculas de água são mais atraídas pelas moléculas do material que constitui o tubo do que pelas moléculas de água inferiores, tensionando desta forma as moléculas vizinhas. Desta forma, através dos fenómenos de coesão e adesão, explica-se a curvatura que se verifica na superfície da água, [1]. Estas forças atrativas intermoleculares entre as superfícies dos sólidos e da água são a causa da subida de água por materiais porosos, gerando interfaces curvas entre o fluido e o ar contido no interior dos poros. Num

tubo capilar o líquido sobe até que o peso da coluna de água (F) equilibre a ação da tensão superficial (σ):

$$F = \rho \cdot g \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = \sigma \cdot \cos \theta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \quad (2.2)$$

Na interface líquido-ar estabelece-se um gradiente de pressões designado por pressão capilar que é função da tensão interfacial σ , dos raios de curvatura R e do ângulo de molhagem Θ (Fig. 2.6) :

$$P_c = P_{ar} - P_{\text{água}} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cos \theta \quad (2.3)$$

em que:

p_c – Pressão capilar [Pa]

p_{ar} – Pressão do ar [Pa]

$p_{\text{água}}$ – Pressão da água [Pa]

Θ – Ângulo de molhagem [°]

σ – Tensão superficial [N/m]

R_1/R_2 – Raios de curvatura [m]

A pressão capilar pode também ser calculada através de:

$$P_c = \frac{2 \times \sigma \times \cos \theta}{r} \quad (2.4)$$

em que:

Θ - ângulo de molhagem [°]

r – Raio capilar [m]

σ – Tensão superficial [N/m]

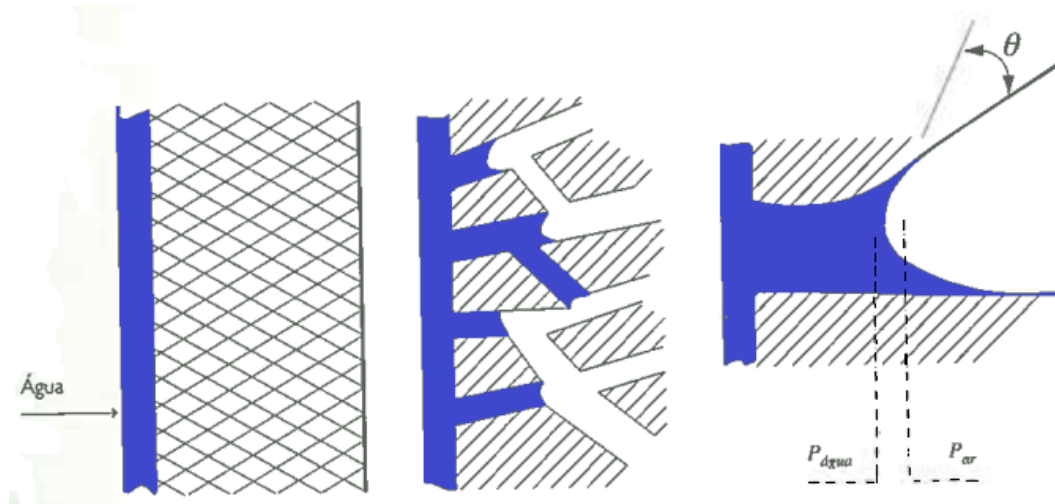


Fig.2.6 – Mecanismos de capilaridade [13].

O ângulo de contato é definido como sendo o ângulo que é formado entre as superfícies do sólido-líquido, o qual resulta do equilíbrio de tensões nas interfaces, sólido-líquido, sólido-ar e líquido-ar. Caso a superfície seja hidrófila, como a dos materiais de construção porosos, o ângulo de contato é inferior a 90° e corresponde, num capilar, a uma formação da frente de água côncava, como representado na Fig. 2.8. No caso de o material ser hidrófugo o ângulo de contato toma valores superiores a 90° e ocorre uma formação convexa na frente de água.

A pressão capilar é função da temperatura e do teor de humidade, σ varia com a temperatura e R varia com o teor de humidade. A curva de pressão capilar depende da lei de distribuição, do raio dos poros e da sua variação. Quanto maior for o teor de humidade menor será a pressão capilar, anulando-se para um teor de humidade máximo. Esta relação entre a sucção capilar e o teor de humidade está expressa na Fig. 2.7.

Tanto a sucção capilar como a altura de ascensão capilar são inversamente proporcionais ao raio dos capilares, na Fig. 2.9 estão os valores de sucção capilar em função do teor de humidade para o betão celular. Enquanto decorre a secagem a água desloca-se dos poros maiores para os poros mais finos, aumentando assim a tensão superficial e aspirando o líquido. Quando definimos a pressão capilar em metros de coluna de água temos a sucção capilar:

$$\Psi = - \frac{P_c}{\rho_l \cdot g} \quad (2.5)$$

em que:

Ψ – Sucção capilar [m.H₂O]

p_c - Pressão capilar [Pa]

ρ_l – Massa volúmica da água [kg/m³]

g – Aceleração da gravidade [m/s²]

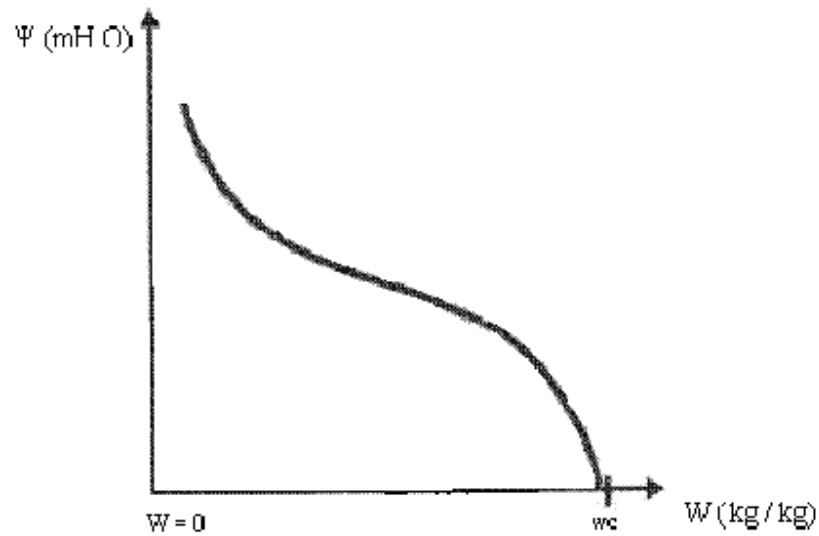


Fig.2.7 – Variação da sucção capilar com o teor de água.

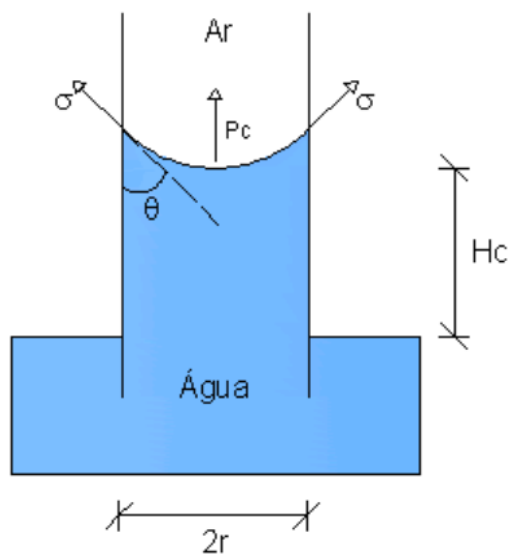


Fig.2.8 – Pressão capilar dentro de um poro capilar [4].

A lei de Poiseuille define a progressão da água em função do tempo:

$$x(t) = \sqrt{\frac{\sigma r \cdot \cos \theta}{2 \cdot \mu}} \quad (2.6)$$

em que:

$x(t)$ – avanço da água no capilar, em função do tempo [m]

t – tempo [s]

μ – viscosidade da água [kg/m.s]

σ – tensão capilar [N/m]

r – raio do capilar [m]

Θ – ângulo de molhagem [°]

Esta lei permite evidenciar que os poros de maior raio são os que se enchem em primeiro lugar e que a profundidade de penetração capilar aumenta com a temperatura, visto que, apesar de tanto σ como μ diminuírem com o aumento da temperatura, a variação de μ é muito superior à de σ , e como o avanço da água capilar é inversa da viscosidade, a sua redução leva a que $x(t)$ aumente [1].

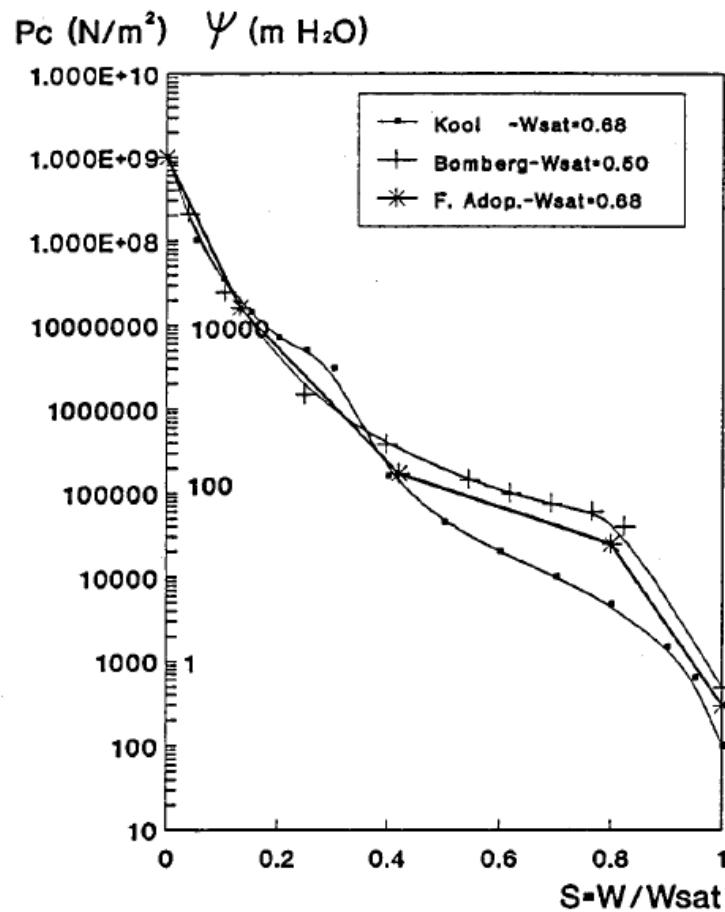


Fig.2.9 – Sucção capilar do betão celular em função do teor de humidade [2].

2.2.5 MODELOS TEÓRICOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE EM MEIOS POROSOS

2.2.5.1 Generalidades

Na última década houve várias teorias de transferência de humidade que foram desenvolvidas baseadas na mecânica dos fluidos usando as leis de massa de Fick ou Darcy. Holm e Künzle [14] [15]

compararam diferentes modelos de transferência de humidade e verificaram que as diferenças não eram significativas, apresentando ainda as respetivas limitações.

O transporte de humidade é atribuído a dois mecanismos, ao transporte de vapor, que pode ser descrito pela lei de Fick, e ao transporte líquido, que pode ser descrito pela lei de Darcy [8] [16].

2.2.5.2 No estado de vapor

Nos materiais porosos, o transporte de vapor de água pode ser descrito pela lei da difusão de Fick [1]. A lei diz que, quando um material estiver exposto a ambientes com um valor de humidade relativa superior, isto é, com uma pressão de vapor maior, ocorre transporte de humidade do ambiente para o material, equilibrando-se, desta forma, os gradientes de pressão de vapor. Há assim uma transferência de humidade do meio com maior concentração para o meio com menor concentração de vapor. O fluxo de difusão de vapor é diretamente proporcional ao gradiente de concentração de vapor de água. Em condições isotérmicas a difusão de vapor no ar é dada pela seguinte expressão:

$$\vec{j}_w = -D_w \times \vec{\nabla} c_w \quad (2.9)$$

em que:

\vec{j}_w – fluxo de difusão do vapor [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

D_w – coeficiente de difusividade hídrica [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

c_w – concentração de vapor de água [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Pode ainda, no cálculo do fluxo de difusão, substituir-se a concentração de vapor de água, c_w , pela pressão parcial do vapor de água. Como restrição para a utilização da fórmula de difusão de vapor de água, em materiais porosos, está o facto de só ser possível a sua utilização em casos que o diâmetro dos poros é superior a 10^{-6} m [17].

Para que a equação seja válida, a pressão de vapor não deve exceder 10% da pressão total, caso contrário ocorre um fenómeno de convecção. Também é possível utilizar a equação da difusão de Stevan, substituindo assim a equação de difusão de Fick [17]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_w \nabla w + \delta \nabla p_s) \quad (2.11)$$

em que:

W – quantidade de água [kg/m^3]

D_w – coeficiente de difusividade hídrica [m^2/s]

p_s – pressão de vapor [Pa]

δ – permeabilidade ao vapor de água [kg/msPa]

A evaporação da humidade que se encontra à superfície do corpo saturado para o meio ambiente, onde este se encontra a secar, obedece à lei de difusão superficial de vapor, e pode ser expressa em função

das concentrações de vapor à superfície do corpo e no meio envolvente, através da expressão que se segue [13]:

$$g_v = \beta \cdot (C'_s - C'_a) \quad (2.12)$$

em que:

g_v – fluxo de vapor [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

β – coeficiente de transferência superficial de humidade [m/s^2]

C'_s – concentração de vapor de água à superfície [kg/m^3]

C'_a – concentração de vapor de água na ambiência [kg/m^3]

Caso não exista uma grande diferença entre a temperatura do ar e a da superfície do material, para uma humidade relativa elevada, $C'_s - C'_a$ tende para zero tal como o fluxo de secagem, o que se traduz numa maior dificuldade na secagem em locais com elevada humidade relativa.

O coeficiente de transferência superficial de humidade é dependente de vários fatores, sendo eles, o teor de humidade do material poroso à superfície, a humidade relativa do meio envolvente, a temperatura a que se encontra o material e o ambiente, a rugosidade da superfície do material, a turbulência e velocidade do ar na superfície do corpo, e por fim a convecção e radiação à superfície.

2.2.5.3 No estado líquido

A lei de Darcy é muito usada para definir a transferência de humidade no estado líquido, ao descrever o fluxo de um fluido através de um meio poroso. Darcy foi pioneiro no estudo do fluxo de humidade em meios porosos, formulando a lei através dos resultados experimentais obtidos num estudo que consistia em fazer passar um fluxo de água por camadas de solo. Foi proposto por Darcy que, para um fluxo horizontal, a vazão do fluido (volume por unidade de tempo) que flui através de uma amostra do meio poroso de comprimento L e área A , é dada por:

$$g_l = - \frac{K_l A}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.13)$$

em que:

L – comprimento do meio poroso [m]

A – área da seção reta do meio poroso [m^2]

ΔP – diferença de pressão aplicada na amostra [Pa]

K_l – permeabilidade absoluta ao líquido [s]

μ – viscosidade do fluido [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

O fluxo do líquido pode ser dado também por [8]:

$$g_l = -K_l \nabla p_c \quad (2.14)$$

em que:

g_l – fluxo de água líquida [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

K_l – permeabilidade absoluta ao líquido [s]

p_c – pressão capilar [Pa]

O fluxo médio que atravessa uma dada secção de um material poroso é dado pela seguinte expressão:

$$F_w = D_w \cdot p_0 \cdot \frac{\partial m}{\partial x} \quad (2.15)$$

em que:

F_w – fluxo de humidade [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

D_w – coeficiente de difusividade hídrica [m^2/s]

p_0 – massa volúmica do material seco [kg/m^3]

M – teor de humidade do material [kg/kg]

2.2.5.4 No estado de vapor e líquido

Há modelos que servem para definir o transporte de humidade global em materiais porosos, como o modelo baseado em Luikov, e em, Philip e de Vries. Este modelo relaciona o transporte de humidade com a temperatura e o gradiente de teor de água. O sistema de equações proposto por ambos é análogo, estando a diferença unicamente na escolha do tipo de variável para o teor de humidade, sendo ponderal (kg/kg) para Philip e de Vries, e volúmica para Luikov (m^3/m^3). A equação que descreve o transporte de humidade é [17], [2]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(D_w \frac{\partial M}{\partial x} + D_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.16)$$

em que:

M – teor de humidade [kg/kg]

D_w – coeficiente de difusividade hídrica [m^2/s]

D_t – coeficiente de difusividade higrotérmica [$\text{m}^2/\text{s.K}$]

T – temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

Contudo este modelo apresenta algumas limitações, nomeadamente [2]:

- A estrutura dos materiais tem de ser indeformável, o que é válido para a generalidade dos materiais de construção.
- Os materiais devem ser isotrópicos e macroscopicamente homogêneos.
- A “histeresis”, comportamento diferencial em embebição e secagem, não é considerada.
- No modelo não se considera o fenómeno de congelamento, ebulição ou degelo, pelo que a temperatura dos materiais deve estar compreendida entre os 4°C e os 99°C.

Na generalidade, os materiais utilizados na envolvente de edifícios são indeformáveis, homogêneos e isotrópicos, ainda que, a isotropia nem sempre ocorra. Medições efetuadas em placa de fibra de vidro revelam diferentes valores de coeficiente de difusividade hídrica consoante a direção considerada. A utilização destes modelos na presença de paredes com múltiplas camadas, mostrou-se de difícil resolução, uma vez que a caracterização das condições fronteira e de interface é indefinida.

Embora o modelo só considere temperaturas compreendidas entre os 4°C e os 99°C, as envolturas de edifícios podem encontrar-se submetidas a valores de temperatura inferiores a 4°C em certas regiões durante o Inverno.

O coeficiente de difusividade hídrica (D_w) em regime isotérmico é definido como sendo o parâmetro que liga o gradiente médio do teor de humidade ao fluxo médio de humidade (fase líquida e fase vapor). Este coeficiente é variável com a temperatura e sobretudo com o teor de humidade [2], dependendo do tipo de estrutura porosa do material e do gradiente de humidade [9].

O coeficiente de difusividade higrótérmica (D_t), variável com a humidade e com a temperatura, traduz o efeito de termomigração na transferência global de humidade, e é um parâmetro que intervém nas equações gerais que permitem a modelização do fenómeno [2].

2.3. CINÉTICA DE SECAGEM

2.3.1. INTRODUÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM

A secagem trata-se de um processo de transferência de massa complexo, durante o qual ocorrem muitas mudanças estruturais e físico-químicas no interior dos materiais ou alimentos. Através de estudos realizados no âmbito da secagem, é possível determinar as condições operacionais ideais consoante o material a secar. Para se fazer a escolha das condições operacionais, são empregues modelos matemáticos que nos últimos anos, têm sido sobretudo usados na indústria alimentar. Estes modelos são ainda utilizados no controle das operações de secagem, podendo prever-se o desempenho através de uma simulação teórica.

Como já referido, a água é o agente que maior influência tem na durabilidade dos materiais de construção. É através do processo de absorção, e particularmente durante a secagem, que são causados danos nos materiais [18]. Por esta razão, o estudo da cinética de secagem para materiais de construção porosos torna-se da maior importância, uma vez que, ao permitirem obter uma relação entre os fatores externos e a humidade contida nos materiais, estabelecem-se novos sistemas de secagem e melhoram-se os sistemas existentes. Os principais fatores externos que têm vindo a ser estudados são a humidade relativa, a temperatura e a velocidade do ar (sendo estes os principais parâmetros da cinética de secagem). Há outras variáveis, abordadas em alguns estudos, tais como as características do material, o tipo de material a secar e o tempo de secagem. Estes estudos visam otimizar o processo de secagem ao reduzir os tempos e os custos inerentes ao mesmo, através do aumento da produtividade dos

equipamentos utilizados e da redução do consumo de energia, melhorando desta forma a qualidade do produto final [19].

A secagem é um dos métodos mais utilizados para conservar alimentos, estendendo a sua vida útil através da remoção da água, o que evita fenómenos de deterioração devido a microrganismos, enzimas ou fermentos. A secagem dos produtos alimentares facilita também o transporte do próprio produto, ao reduzir o peso do mesmo e ao melhorar as suas características de compactação. Nos últimos anos, nas áreas da indústria alimentar e química, têm vindo a ser desenvolvidos estudos na cinética de secagem, aplicando e concebendo modelos matemáticos que descrevem a secagem. Recentemente tem surgido também um número crescente desses estudos na área de engenharia civil, nos quais é feito um reaproveitamento dos modelos já utilizados na indústria alimentar para os materiais de construção.

Atualmente considera-se que a primeira fase do fenómeno de secagem é controlado por mecanismos de difusão de líquido e/ou vapor. São utilizados, no estudo da secagem, modelos de camada fina que pressupõem uma camada de material suficientemente fina para que as condições externas do ar se mantenham constantes no material durante a secagem. Estes modelos são, segundo a literatura, distribuídos em três categorias [20] [21], sendo estas teórica, semi-teórica e empírica, e assumem ainda que a resistência ao fluxo de humidade está uniformemente distribuída pelo interior do material homogéneo isotrópico.

Os modelos teóricos, consideram as resistências internas ao fluxo de humidade, enquanto que os modelos semi-teóricos e empíricos refletem apenas resistências externas à transferência de humidade entre o material e o ar.

Os modelos teóricos consistem na resolução das equações gerais de secagem, utilizando um método analítico ou numérico. Inicialmente foram usadas algumas simplificações de resoluções analíticas da segunda lei de Fick. Crank [22] deu soluções analíticas da equação (2.17) para vários produtos de geometria regular, com formas retangulares, cilíndricas e esféricas. A combinação dessas soluções com a de Arrhenius permitiu prever o processo de secagem de alguns produtos como arroz, colza, cortiça, utilizando soluções numéricas de transferência de massa e calor. A simulação de secagem por determinação numérica de equações é sobretudo teórica, e devido à complexidade dos fenómenos é muito difícil de abordar.

Os modelos semi-teóricos advêm geralmente da simplificação das soluções da segunda lei de Fick (que é um modelo teórico) ou da modificação de modelos simplificados e válidos dentro dos limites de temperatura, humidade relativa, velocidade do ar e quantidade de água limiar para os quais foram desenvolvidos [23]. Estes modelos apresentam uma maior facilidade de utilização requerendo pouco tempo para serem utilizados, em comparação com os modelos teóricos. São simplificados e em alguns casos têm a adição de coeficientes empíricos para melhorar a aproximação da curva de secagem aos dados experimentais. A dificuldade que há em selecionar um coeficiente de difusão durante a secagem dificulta a utilização deste tipo de modelo. Por motivos de simplificação é escolhido um coeficiente de difusão constante. Desta forma surge o conceito da curva característica de secagem e expressa-se a taxa de secagem em função do teor em água do material. No entanto, essa aproximação não representa um modelo físico do fenómeno de secagem. Entre os modelos semi-teóricos encontram-se o modelo de dois termos, o modelo de Henderson e Pabis, o modelo de Page, o modelo de Page modificado e o modelo de Newton.

Os modelos empíricos que se utilizam são modelos semi-teóricos, que por sua vez são baseados no modelo teórico da segunda lei de Fick. Estes modelos derivam da relação entre o teor de água no material e o tempo de secagem. O aspeto fundamental do processo de secagem é desvalorizado neste tipo de modelo, o que se deve à necessidade de encontrar uma relação entre os valores experimentais e

as curvas obtidas através dos modelos propostos. O ajuste feito entre os resultados experimentais e as curvas teóricas dos modelos permite prever o comportamento do material durante a secagem. Já foram utilizados e adaptados satisfatoriamente modelos empíricos para vários produtos alimentares, como o arroz e o feijão branco. Entre estes modelos estão o modelo de Thompson e o modelo de Wang e Singh.

Para uma variação de volume desprezável, a lei da difusão de Fick pode ser representada por:

$$\frac{dM}{dt} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (2.17)$$

em que:

$\frac{dM}{dt}$ – taxa de secagem [-]

D_{eff} – Coeficiente de difusividade efetiva [m^2/s]

M – teor de humidade no material [kg/kg]

t – tempo [h]

2.3.2. CONSTATANTE DE SECAGEM K

A constante de secagem k , adequa-se a situações de otimização, em qualquer caso em que se utilize um grande número de cálculos com modelos iterativos. Através de uma função exponencial, permite obter as propriedades de transporte de água no material. São englobados por k todos os fenómenos de transporte que ocorrem durante a secagem, o que facilita a simulação do processo de secagem, não sendo assim necessário resolver numericamente e em separado todas as equações de transporte que estão envolvidas no processo de secagem.

Tabela 2.1 – Efeito de vários fatores na constante de secagem para vários materiais [24].

Efeito de vários fatores na constante de secagem (k)

Nº da equação	Materiais de aplicação	Equação
T1 a	Grãos, cevada, alguns produtos agrícolas	$K(T_A) = b_0 \exp[-b_1/T_A]$
T1 b	Cevada, trigo	$K(T_A) = b_0 \exp[-b_1/(b_2 + b_3 T_A)]$
T1 c	Melão	$K(a_w, T_A) = b_0 \exp[-(b_1 + b_2 a_w)/T_A]$
T1 d	Milho	$K(a_w, T_A) = b_0 \exp(-b_1 a_w) \exp[-b_2/(b_3 + b_4 T_A)]$
T1 e	Arroz	$K(a_w, T_A) = b_0 + b_1 T_A - b_2 a_w$
T1 f	Trigo	$K(a_w, T_A) = b_0 + b_1 T_A^2 - b_2 a_w$
T1 g	Cenoura	$K(u_A) = \exp(-b_1 + b_2 \ln u_A)$
T1 h	Batata, cenoura, cebola, pimento	$K(a_w, T_A, d, u_A) = b_0 a_w^{b_1} T_A^{b_2} d^{b_3} u_A^{b_4}$

Legenda: T_A – Temperatura [°C], u_a – Velocidade do ar [m/s], d – diâmetro dos poros [m] e b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – constantes empíricas ajustáveis

A constante de secagem k é obtida de forma experimental, em condições de humidade relativa, temperatura e velocidade do ar constantes, sendo o teor de humidade no material controlado em função do tempo. Para o seu cálculo, pode ser empregada a equação de secagem em camadas finas (2.20), através do uso dos dados experimentais obtido na secagem. Visto ser representativa dos vários processos de transporte que decorrem na secagem, a constante k , é dependente das propriedades do material e da ambiência. Logo, é função da espessura do material, humidade relativa, velocidade do ar e temperatura [24]. Existem estudos na literatura que descrevem o efeito de vários fatores na constante de secagem de diferentes materiais, tal como se exemplifica na Tabela 2.1.

As constantes empíricas não devem ser calculadas através de argumentos teóricos, visto que neste caso não teriam significado. Se for assumido que, para algumas condições de secagem, o mecanismo de controlo é a difusão de humidade no material, então a constante de secagem pode ser expressa como uma função da difusividade do vapor de água. Para lajes, por exemplo, a seguinte equação é válida:

$$k = \pi^2 \frac{D_{\text{eff}}}{l^2} \quad (2.18)$$

em que:

l – Espessura da laje [m]

D_{eff} – Coeficiente de difusividade efetiva [m^2/s]

k – constante de secagem [h^{-1}]

2.3.3. MODELOS DE SECAGEM DE PRIMEIRA ORDEM E CONSTANTE DO TEMPO DE SECAGEM

Já foram usados vários modelos de transferência de humidade para descrever o processo de secagem em materiais porosos. Karoglou *et al* [25] utiliza um modelo de primeira ordem que descreve o fenómeno de transferência de massa. O fluxo de secagem tem inicialmente um período em que é

constante, durante o qual a água que já se encontra na superfície do material é evaporada. Na maioria dos casos, considera-se adequado para descrever este período, um modelo da cinética de secagem de primeira ordem.

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{1}{t_c}(M - M_e) \quad (2.19)$$

em que:

$\frac{dM}{dt}$ – taxa de secagem [-]

M – teor de humidade no material [kg/kg]

M_e – teor de humidade de equilíbrio [kg/kg]

t_c – Tempo de secagem [h]

t – tempo [h]

A equação (2.19), pode ainda ser apresentada substituindo a constante do tempo de secagem, t_c , pela constante de secagem k (2.20), sendo a relação entre as constantes (2.23).

$$-\frac{dM}{dt} = k(M - M_e) \quad (2.20)$$

em que:

$\frac{dM}{dt}$ – taxa de secagem [-]

k – constante de secagem [h^{-1}]

M – teor de humidade no material [kg/kg]

M_e – teor de humidade de equilíbrio [kg/kg]

Sempre que as condições de secagem são mantidas constantes podemos integrar a equação (2.19):

$$t = t_c \ln \left(\frac{M - M_e}{M_i - M_e} \right) \quad (2.21)$$

em que:

M_i – teor de humidade inicial no material [kg/kg]

M_e – teor de humidade de equilíbrio [kg/kg]

M – teor de humidade no material [kg/kg]

t_c – Tempo de secagem [h]

A equação (2.21), permite calcular o tempo t necessário, para evaporar a humidade M_i até ao valor final M no tempo t .

Assim que o teor de humidade de equilíbrio é atingido, estabelece-se o equilíbrio termodinâmico entre a envolvente e o material. O teor de humidade de equilíbrio, aparece em vários modelos de secagem. A relação entre o teor de humidade de equilíbrio, M_e , e a atividade da água, a_w , para uma dada temperatura, é conhecida como curva isotérmica de absorção. Esta curva expressa o valor mínimo do teor de humidade que pode ser atingido por um material durante a secagem para uma dada humidade relativa do ar. A atividade da água, a_w , à pressão e temperaturas que normalmente ocorrem no fenómeno de secagem, é igual à humidade relativa do ar. O teor de humidade de equilíbrio M_e , tanto pode ser atingido por absorção ou desabsorção, como expresso na Fig. 2.12. O desvio que ocorre entre as duas curvas é devido ao fenómeno de histerese, que ainda não foi quantitativamente descrito. No caso da secagem, a curva que estabelece uma relação entre M_e e a_w que se deve utilizar é a curva da desabsorção representada na Fig 2.12 [24].

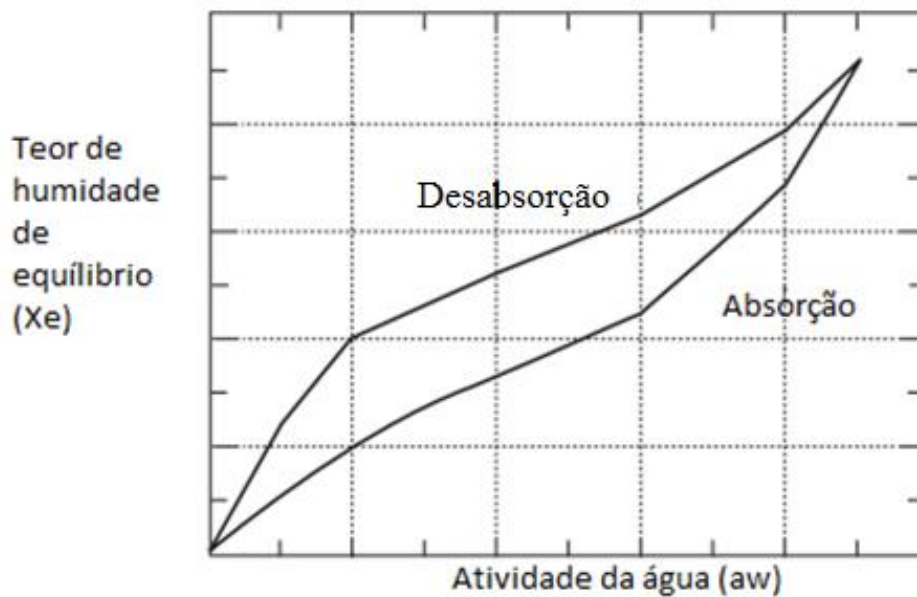


Fig.2.12 – Histerese entre isotermas de absorção e desabsorção [24].

Para o cálculo da constante do tempo de secagem, é usada a terminologia para sistemas dinâmicos de primeira ordem (2.22). O significado físico do seu valor é o tempo requerido para remover dois terços da humidade total. Tal como a constante de secagem k , t_c é dependente das propriedades do material e da ambiência (temperatura, humidade relativa e velocidade do ar).

Segundo Karoglou *et al* [25], um modelo de potências parece adequado para descrever a secagem na maioria dos casos, visto que incorpora o efeito das condições de secagem do ar.

$$t_c = c_0 \left(\frac{T}{T_r} \right)^{c_1} \left(\frac{a_w}{a_{wr}} \right)^{c_2} \left(\frac{u_a}{u_r} \right)^{c_3} \quad (2.22)$$

em que:

T – Temperatura [°C]

c_0, c_1, c_2, c_3 – constantes empíricas ajustáveis [-]

T_r – Temperatura de referência [°C]

a_{wr} – atividade da água de referência [-]

a_w – atividade da água [-]

u_r – velocidade do ar de referência [m/s]

u_a – velocidade do ar [m/s]

t_c – Tempo de secagem [h]

O valor das constantes empíricas ajustáveis depende das características físicas do material e da sua geometria [25]. A constante do tempo de secagem t_c pode, através da equação (2.23), relacionar-se com a constante de secagem k :

$$t_c = \frac{1}{k} \quad (2.23)$$

Karoglou *et al* [25] estima os parâmetros envolvidos nos modelos da análise do processo de secagem através da minimização do desvio padrão:

$$S = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(M - M^*)^2}{(N - p)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

em que:

M – teor de humidade no material [kg/kg]

M^* – teor de humidade teórico contido no material [kg/kg]

N – número de observações [-]

p – número de parâmetros estimados [-]

2.3.4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM, RAZÃO DA HUMIDADE MR

A fórmula utilizada para o cálculo da razão da humidade na literatura é a seguinte:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \quad (2.25)$$

em que:

MR – razão de humidade durante a secagem [-]

M – teor de humidade no material [kg/kg]

Me – teor de humidade de equilíbrio [kg/kg]

Mi – teor de humidade inicial no material [kg/kg]

Panchariya [20] usa a equação 2.26 para calcular o teor de humidade de equilíbrio para chá preto.

$$M_e = \frac{(a_w M_m c k)}{[(1 - k a_w)(1 + c k a_w - k a_w)]} \quad (2.26)$$

$$c = c_0 \exp\left(\frac{c_1}{RT_{ab}}\right) \quad (2.27)$$

$$k = k_0 \exp\left(\frac{k_1}{RT_{ab}}\right) \quad (2.28)$$

em que:

R – Constante universal dos gases perfeitos [kJ/mol.K]

c₀, c₁, k₀, k₁ – constantes empíricas [-]

a_w – atividade da água [-]

O teor de humidade de equilíbrio do material ,M_e, depende da temperatura do ar ,T, e da atividade da água a_w. Há vários modelos empíricos e semi-teóricos propostos na literatura. Karoglou *et al* [25] [18], usou o modelo de Oswin modificado para o cálculo de M_e (2.29). As constantes empíricas b₀, b₁, b₂ são dependentes das características do material.

$$M_e = b_0 \exp\left(\frac{b_1}{T}\right) \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^{b_2} \quad (2.29)$$

em que:

b₀, b₁, b₂ – constantes empíricas ajustáveis [-]

a_w – atividade da água [-]

T – Temperatura [°C]

Me – teor de humidade de equilíbrio [kg/kg]

Kuitche *et al* [21] considera que quando os valores de M_e são relativamente pequenos comparativamente com os valores de M e M_i , pode-se desprezar o valor de M_e , sendo o cálculo da razão de humidade feito por (2.30).

$$MR = \frac{M}{M_i} \quad (2.30)$$

2.3.5. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ESCOLHA DO MODELO DE SECAGEM QUE MELHOR DEFINE A CURVA DE SECAGEM

Na literatura há vários parâmetros que podem ser utilizados na escolha do modelo de cinética de secagem. Estes parâmetros permitem a seleção do modelo da cinética que melhor se adapta aos resultados experimentais. Entre estes parâmetros estão coeficiente de regressão (R^2), a soma dos erros quadrados entre experimental e teórico (SSE) e a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE). A otimização é feita através do maior valor de R^2 , do menor valor de SSE e do menor valor do RMSE [26].

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{teo,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{teo,i} - MR_{exp,i})^2} \right] \quad (2.31)$$

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{teo,i})^2}{N} \quad (2.32)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{teo,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

em que:

$MR_{teo,i}$ – Razão da humidade teórica prevista i [-]

$MR_{exp,i}$ – Razão da humidade experimental i [-]

N – número de observações [-]

n – número de constantes [-]

Roberts *et al* [27] na escolha da equação da cinética de secagem que melhor se adequava aos resultados, usou uma conjugação da raiz quadrada do erro médio quadrático (2.33), chi-quadrado (χ^2) e o erro percentual relativo PE (%). Através do uso do chi-quadrado e do erro percentual relativo, as melhores aproximações são feitas quando estes tomam os valores mais baixos.

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{teo},i})^2 \quad (2.34)$$

$$PE(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{teo},i}|}{MR_{\text{exp},i}} \quad (2.35)$$

Togrul [28] usa ainda um outro parâmetro, o erro médio de viés (MBE):

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{teo},i}) \quad (2.36)$$

Estes parâmetros comparam as diferenças entre as razões de humidade teóricas previstas e as razões de humidade experimentais. O erro percentual relativo PE (%) trabalha com as diferenças absolutas entre as duas razões.

Martins [29] adotou como parâmetro de erro a menor soma das percentagens do desvio entre os dados experimentais (MR_{exp}) e os teóricos (MR_{teo}) ao longo do tempo:

$$Erro(\%) = \sum (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{teo}})^2 \quad (2.37)$$

2.3.6. MODELOS DA CINÉTICA DE SECAGEM

Há vários estudos realizados dentro do âmbito da cinética de secagem. O modelo de Newton foi o primeiro modelo da cinética desenvolvido. Este modelo foi obtido por simplificação da segunda lei de Fick. Através do modelo de Newton foram surgindo estudos onde se conceberam novos modelos para diferentes materiais ensaiados.

- Modelo de Newton ([30], [31], [21], [26], [28], [20])

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.38)$$

- Modelo de Page ([30], [31], [21], [26], [28], [20])

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (2.39)$$

- Modelo de Page modificado ([31], [28], [20])

$$MR = \exp[-(kt)^n] \quad (2.40)$$

- Modelo de Henderson-Pabis ([30], [31], [21], [26], [28], [20])

$$MR = a \cdot \exp(-kt) \quad (2.41)$$

- Modelo Logarítmico ([31], [21], [26], [28], [30])

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (2.42)$$

- Modelo de dois termos ([21], [28], [30], [20])

$$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad (2.43)$$

- Modelos de aproximação da difusão ([21], [28], [30])

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (2.44)$$

- Modelo de Midilli *et al* ([30], [21], [28])

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (2.45)$$

- Modelo de Wang e Singh ([31], [26], [28], [30])

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (2.46)$$

- Modelo de Thomson ([28])

$$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2 \quad (2.47)$$

- Modelo de Verma ([28], [30])

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt) \quad (2.48)$$

- Modelo de Henderson-Pabis modificado ([26], [28])

$$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (2.49)$$

- Modelo exponencial de dois termos ([28])

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (2.50)$$

- Modelo de Aghbashlo *et al* ([26])

$$MR = \exp\left(\frac{-k_1 t}{1 + k_2 t}\right) \quad (2.51)$$

- Modelo de Vega e Lemus ([31])

$$MR = (a + kt)^2 \quad (2.52)$$

- Modelo de Hii *et al* ([30])

$$MR = a \exp(-kt^n) + b \exp(-gt^n) \quad (2.53)$$

em que:

t – tempo de secagem [h]

k – coeficiente empírico do modelo de secagem [h^{-1}]

k_1 – coeficiente empírico do modelo de secagem [h^{-1}]

k_2 – coeficiente empírico do modelo de secagem [h^{-1}]

g – coeficiente empírico do modelo de secagem [h^{-1}]

a, b, c, n – constantes empíricas do modelo de secagem

Por conveniência de representação gráfica as equações atrás descritas podem ser apresentadas na forma normalizada, dando como exemplo as seguintes equações (2.54), (2.55), (2.56).

- Modelo de Newton normalizado

$$\ln(MR) = -k \cdot t \quad (2.54)$$

- Modelo de Page normalizado

$$\ln[-\ln(MR)] = \ln(k) + n \cdot \ln(t) \quad (2.55)$$

- Modelo de Henderson-Pabis normalizado

$$\ln(MR) = -kt + \ln(a) \quad (2.56)$$

O modelo de Henderson e Pabis é o primeiro termo de uma série de soluções da segunda lei de Fick e foi usado na secagem de milho antes de ganhar maior popularidade. O modelo de Page é uma modificação do modelo de Newton e foi concebido com o intuito de superar as principais lacunas desse modelo [20]. O modelo de dois termos é derivado de uma solução analítica dos dois primeiros termos da lei de Fick [30]. O modelo de Hii et al foi concebido através de uma combinação do modelo de Page e do modelo de dois termos, foi utilizado para a secagem de grãos de cacau [30].

2.3.7. DIFUSIVIDADE EFETIVA DO VAPOR DE ÁGUA E ENERGIA DE ATIVAÇÃO

Para se fazer uma análise da transferência de humidade, é necessário prever corretamente os parâmetros de difusão na secagem de objetos sólidos. Desta forma há uma otimização da energia despendida e um melhor ajuste das condições de secagem, tornando-se mais eficiente [5].

A difusividade do vapor de água deve ser determinada experimentalmente, através dos perfis de humidade transitórios durante os vários processos de transporte de humidade [32]. Pel *et al* [32] mediu os perfis de humidade transitórios utilizando a ressonância magnética com a finalidade de determinar a difusividade do vapor de água.

Freitas [2], para determinar a difusividade efetiva do vapor de usou o modelo da difusão de Fick (2.57).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2.57)$$

Para ser feita a análise da difusão é necessário que exista movimentação da humidade interna, não haja alteração das dimensões do provete durante o processo de secagem, e que o efeito da transferência externa e interna do calor seja insignificante [33].

Crank [22] propôs soluções do modelo da difusão de Fick para diferentes formas geométricas. Considerando uma difusividade de humidade constante, uma placa infinita e uma distribuição inicial da humidade uniforme pelo material, a equação de Fick é representada da seguinte forma [22] [33]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} \exp \left[-(2N+1)^2 \pi^2 \frac{D_{EFF} T}{L^2} \right] \quad (2.58)$$

em que:

MR – Razão de humidade [-]

D_{eff} – Coeficiente de difusividade efetiva [m^2/s]

t – tempo [h]

L – espessura da amostra [m]

N – número de observações [-]

A equação (2.58) pode ainda ser simplificada da seguinte forma [34] [33]:

$$MR = \frac{M}{M_i} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2}\right) \quad (2.59)$$

A difusividade efetiva do vapor de água é obtida através do traçado, num diagrama semi-logarítmico, dos valores da razão de humidade obtidos experimentalmente, em função do tempo. No primeiro período estes pontos traçados formam uma reta, sendo o seu declive [33]:

$$\text{declive} = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} \quad (2.60)$$

A energia de ativação é determinada a partir do declive da reta, que representa no gráfico de Arrhenius, $\ln(D_{\text{eff}})$ vs. $(1/T)$. A inclinação desta linha reta é dada por $-E_a/R$ [27]. A energia de ativação é a energia mínima necessária para que uma reação ocorra e determina a maneira como a velocidade de reação varia com a temperatura no caso da secagem [35].

O efeito da temperatura na difusividade efetiva do vapor de água pode ser descrita usando a relação de Arrhenius:

$$D_{\text{eff}} = A_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.61)$$

Normalizando a equação (2.61) obtém-se:

$$\ln(D_{\text{eff}}) = \ln A_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (2.62)$$

em que:

A_0 – Constante de Arrhenius [m^2/s]

E_a – Energia de ativação [kJ/mol]

R – Constante universal dos gases ideais [kJ/mol K]

T – Temperatura [°K]

Relativamente aos resultados apresentados no capítulo 4, a equação (2.59) apenas pode ser aplicada no ensaio de secagem do provete de betão celular impermeabilizado, pois nos ensaios com tijolo maciço estes não eram impermeabilizados. Assim, por forma a determinar a energia de ativação e a constante de Arrhenius dos provetes de tijolo maciço foi aplicada a equação de Peleg [36]:

$$MR = 1 - \frac{t}{k_1 + t.k_2} \quad (2.63)$$

em que:

MR – Razão de humidade [-]

t – tempo [h]

k_1 - constante que descreve a taxa de secagem associada ao modelo de Peleg [h]

k_2 – constante de capacitância do modelo de Peleg [-]

A constante da taxa de secagem associada ao modelo de Peleg (k_1) descreve a taxa de desabsorção (R_0) no início do processo de secagem ($t=0$)

$$R_0 = \frac{1}{k_1} \quad (2.64)$$

em que:

R_0 – Taxa de desabsorção para $t=0$ [h^{-1}]

Por fim, a relação entre $1/k_1$ e a temperatura de secagem pode ser obtida através da equação linearizada de Arrhenius:

$$\ln \left(\frac{1}{k_1} \right) = \ln (A_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (2.65)$$

em que:

k_1 – constante que descreve a taxa de secagem associada ao modelo de Peleg [h]

A_0 – constante de Arrhenius [m^2/s]

E_a – Energia de ativação [kJ/mol]

R – constante universal dos gases ideais [kJ/mol.K]

T – Temperatura [$^{\circ}C$]

3

ENSAIOS LABORATORIAIS

3.1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho foram realizados ensaios de secagem de materiais porosos de construção, nomeadamente betão celular e tijolo cerâmico. Através da utilização dos modelos da cinética de secagem pretendeu-se estabelecer uma relação entre os resultados experimentais da secagem e os valores fornecidos pelos modelos da cinética de secagem, de forma a encontrar o modelo que mais se adequa a cada material. Posteriormente estabeleceu-se uma relação entre os tempos de secagem e os fatores exteriores que influenciam a secagem. Neste caso foram considerados a temperatura e a humidade relativa.

Foram utilizadas para os ensaios, cinco amostras de tijolo cerâmico e duas amostras de betão celular, sendo uma das amostras de betão celular impermeabilizada. Nenhuma destas amostras foi envelhecida.

3.2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

3.2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios foram:

- Cinco amostras de tijolo cerâmico maciço;
- Duas amostras de betão celular;

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios foram:

- Câmara climática;
- Balança de precisão;
- Computador;

3.2.1.1. Câmara climática

A câmara climática é um invólucro usado para testar o efeito das condições ambientais em produtos biológicos ou industriais, materiais e em dispositivos e componentes eletrónicos. Esta pode ser utilizada de várias maneiras, entre as quais:

- Teste dos efeitos das condições ambientais nas amostras;

- Preparação das amostras para outros testes físicos ou químicos;
- Meio de simular as condições ambientais durante outros ensaios;

As câmaras climáticas podem reproduzir várias condições extremas como temperaturas elevadas, chuva, radiação eletromagnética, vácuo, etc. A câmara climática utilizada permite programar as condições de temperatura e de humidade relativa (Fig. 3.1 e 3.2).

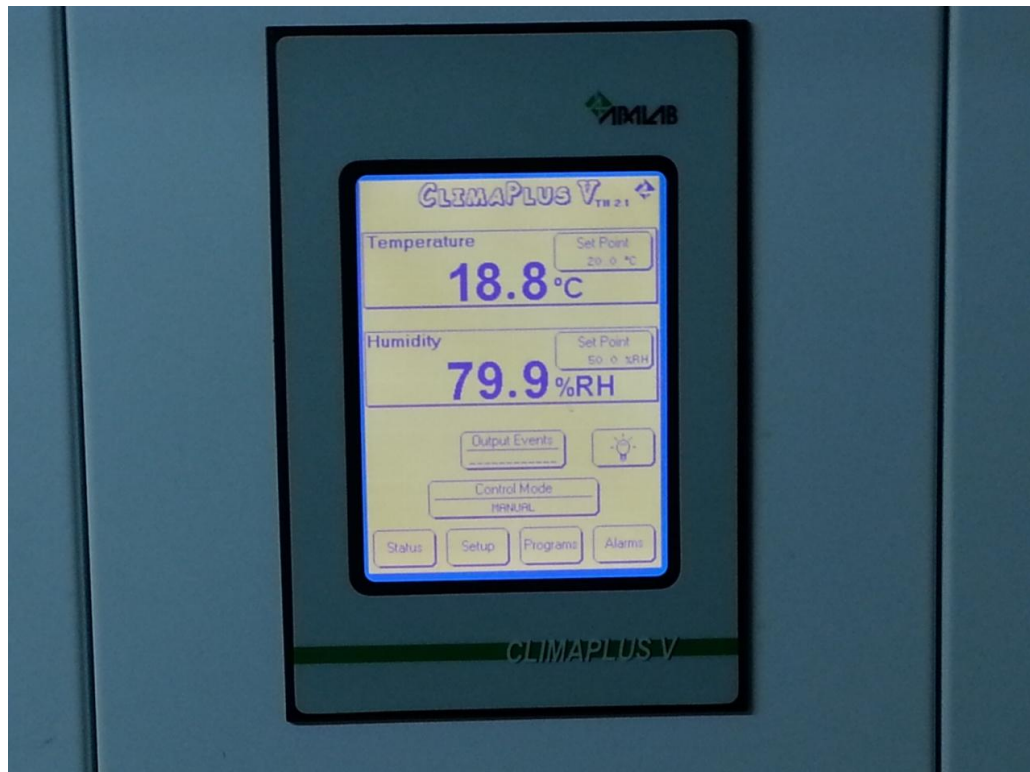


Fig.3.1 – Painel de controlo da câmara climática.



Fig.3.2 – Câmara climática.

3.2.1.2. Balança

A balança utilizada foi uma balança Sartorius, com uma capacidade máxima de 3100g e precisão de 0,01g (Fig. 3.3).



Fig.3.3 – Balança sartorius utilizada nos ensaios.

3.2.1.3. Betão celular

O betão celular tem uma adição de um agente expensor, havendo assim formação de bolhas de ar no seu interior. Este betão é mais homogêneo do que o betão regular visto não conter agregado graúdo, demonstrando, contudo, uma maior variedade de propriedades. As propriedades, por sua vez, são dependentes da microestrutura e da composição do betão, que são influenciadas pelo método utilizado para incorporação de ar, cura, etc. Inicialmente o betão celular era visto unicamente como um material com boas características térmicas e acústicas devido à elevada porosidade. Atualmente, a sua massa reduzida permite retirar peso às fundações, permitindo assim diminuir os custos com a estrutura e aumentar a altura dos edifícios [37].

Tabela 3.1 – Massa volúmica do betão celular [2].

Material	Massa Volúmica ρ_v (kg/m³)
Betão Celular	525

3.2.1.4. Tijolo cerâmico

O tijolo cerâmico é feito através da argila moldada, cortada e levada a cozer em fornos. A argila transforma-se assim num material de construção com uma elevada resistência à compressão e boas propriedades térmicas. O tijolo cerâmico é um material de construção utilizado com frequência em vários países. A sua utilização na construção já data de 7500 a.C., sendo em Portugal um dos materiais de construção mais utilizados. O tijolo cerâmico tem uma boa inércia térmica, o que permite manter o ambiente fresco durante os meses de elevada temperatura e, no Inverno, manter a temperatura interna [38].

Tabela 3.3 – Massa volúmica do barro vermelho [2].

Material	Massa Volúmica ρ_v (kg/m³)
Barro Vermelho	1925

3.2.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para este ensaio foram adquiridos dois tijolos cerâmicos maciços, posteriormente cortados em várias amostras. Os provetes de betão celular escolhidos foram cubos de 6,5 cm de lado. Um deles foi impermeabilizado com duas demãos em quatro faces e colocado na câmara apenas com uma face exposta. As amostras de tijolo cerâmico foram secas em estufa antes de se iniciarem os ensaios devido à necessidade de as molhar para ser feito o corte.



Fig.3.8 – Provete de betão celular impermeabilizado.

Tabela 3.5 – Descrição das amostras de tijolo.

Tijolo cerâmico			
Amostra	Massa Equilíbrio (g)	Lado (cm)	Secção (cm)
1	749,5	11	5,5x5,5
2	696,6	11	5,5x5,11
3	745	11	5,5x5,47
4	710	11	5,5x5,21
5	719,5	11	5,5x5,27

3.2.3. PROCEDIMENTO LABORATORIAL

Para realizar o ensaio colocou-se o provete a testar em equilíbrio com a ambiência, sobre uma balança de precisão (Fig. 3.9).

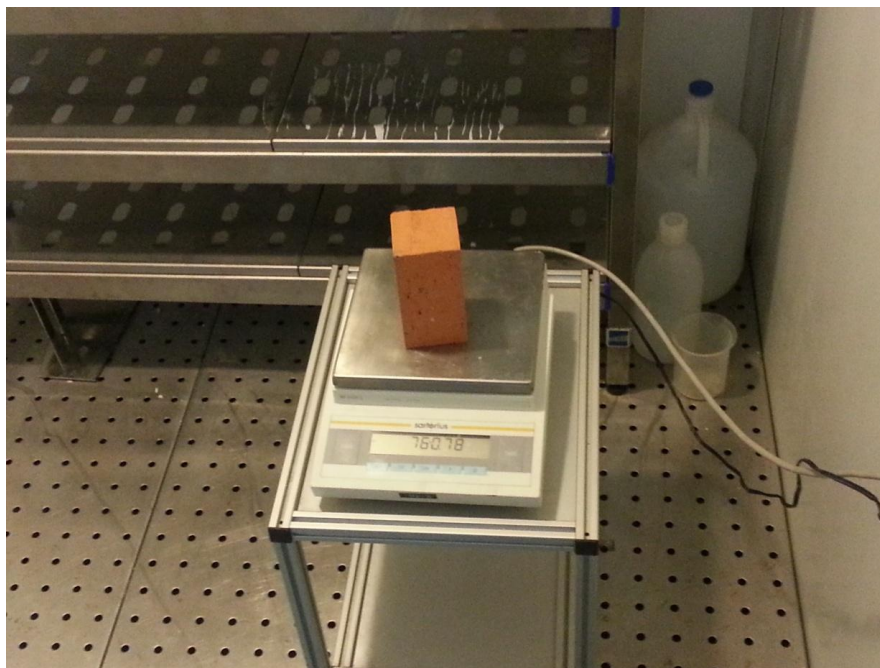


Fig.3.9 – Estabilização do provete na câmara climática.

O peso do provete foi registado de 5 em 5 minutos numa folha de Excel (Fig. 3.10). Como primeiro critério de paragem considerou-se que ao fim de 24 horas, caso seja verificada uma variação da massa inferior a 0,1% o provete está em equilíbrio, podendo desta forma prosseguir-se com o ensaio. Devido ao elevado consumo de tempo que estava associado à estabilização da amostra, e visto que a massa se mantinha aproximadamente constante durante todo este processo, passou a colocar-se o provete durante uma hora a estabilizar na câmara climática e, posteriormente, caso a massa se mantivesse constante durante esta hora, dever-se-ia anotar a massa de equilíbrio. Em alguns casos a estabilização foi feita por períodos superiores a uma hora. Para o cálculo da massa de equilíbrio foi feita a média da última hora de estabilização.

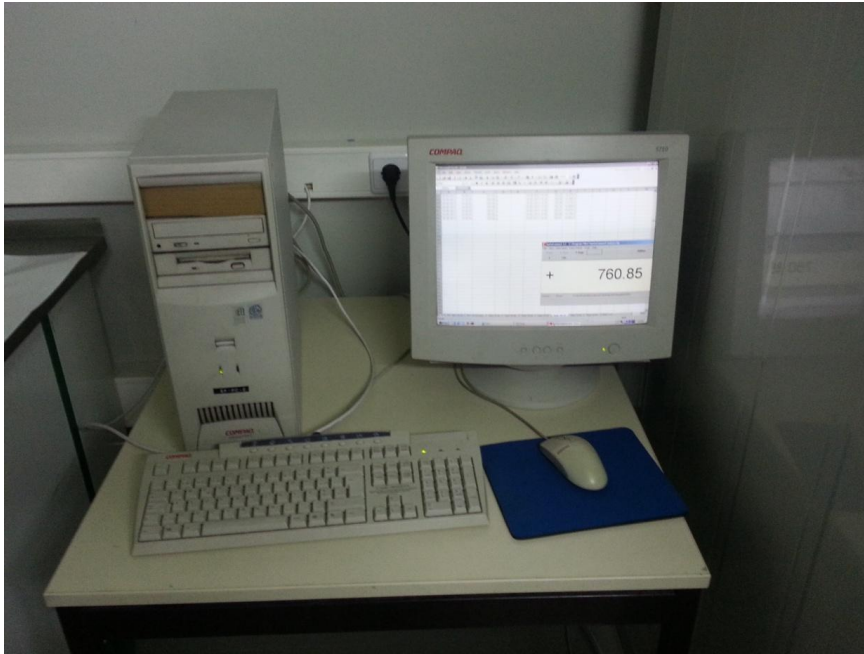


Fig.3.10 – Registro contínuo dos pesos em folha de Excel.

Depois de estabelecido o equilíbrio com a ambiência e se ter definido a massa de equilíbrio, o provete foi imerso em água durante 1 hora, no caso da amostra de tijolo cerâmico. No caso da amostra de betão celular não impermeabilizada o período de imersão foi de 2 horas e no betão celular impermeabilizado foi de 4 horas (Fig. 3.11).

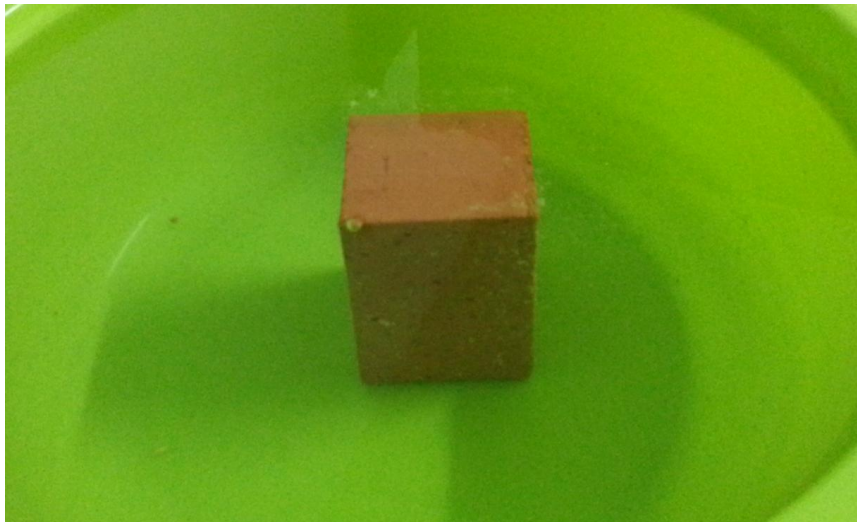


Fig.3.11 – Imersão em água de uma amostra de tijolo.

Concluído o tempo de imersão, retirou-se o provete e deixou-se escorrer durante aproximadamente um minuto. Posteriormente, limpam-se as faces com uma esponja e colocou-se a amostra dentro da câmara climática durante 10 minutos, fazendo-se duas medições da massa.

O processo de imersão do provete foi repetido por mais um período de tempo, que foi de 1 hora no caso do tijolo cerâmico. Passado essa hora repetiu-se o processo de escorrer e limpar as faces do

provete com uma esponja, colocando-o na câmara climática e fazendo duas novas medições da sua massa.

Se entre as primeiras duas pesagens e as segundas não se verificarem alterações significativas da massa, considerou-se o provete estável em termos de massa e que a sua absorção foi concluída, iniciando-se assim a secagem. Critério de paragem: variação da massa absorvida (diferença da massa entre ciclos de embebição) inferior a 0,1%.

Inicialmente o critério de paragem da secagem era o provete apresentar massa atual inferior à massa em equilíbrio com 10% da massa de água absorvida (diferença entre a massa após submersão e a massa em equilíbrio). Visto que no decorrer dos ensaios se verificou que não era possível cumprir este critério em todos os ensaios, passou a utilizar-se como critério que a massa atual do provete fosse inferior à massa em equilíbrio com 20% da massa de água absorvida. O provete tinha ainda que encontrar-se na terceira fase de secagem onde a variação da massa de água já é muito reduzida tal como o fluxo de secagem. Se esta condição se verificasse considerava-se que o critério de paragem se tinha cumprido, iniciando-se um novo ensaio.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os ensaios de secagem foram realizados segundo a metodologia descrita anteriormente, sendo a massa registada de 5 em 5 minutos, através de um computador ligado à balança. Os ensaios foram realizados usando os mesmos equipamentos e os mesmos passos antes da inserção da amostra na câmara climática, de forma a reduzir os erros provenientes da diferença dos equipamentos ou o erro humano. Na Tabela 3.6 apresentaram-se as condições de ensaio e na Tabela 3.7 os resultados obtidos.

Tabela 3.6 – Descrição das condições dos ensaios.

Ensaio	Amostra	Temperatura (°C)	% Humidade relativa
1	B1	25	50
2	(Imp) B2	25	50
3	T1	15	65
4	T5	20	65
5	T5	25	65
6	T3	30	65
7	T1	15	50
8	T1	20	50
9	T2	25	50
10	T3	30	50
11	T2	20	80
12	T4	25	80
13	T5	15	80
14	T4	30	80

Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de secagem.

Ensaio	Amostra	Massa Inicial (g)	Tempo de embebição (h)	Massa após embebição (g)	Massa de água absorvida (g)	Massa de água final (g)	Tempo de secagem	% de água final
1	B1	179,74	6	283,89	104,15	10,37	142h	10%
2	(Imp) B2	189,75	220	304,64	114,89	28,33	362h 30min	25%
3	T1	748,59	1	826,87	78,28	13,38	93h	17%
4	T5	719,41	1	788,6	69,19	11,37	90h	16%
5	T5	719,67	1	789	69,33	12,39	65h 30min	18%
6	T3	745,04	1	833,42	88,38	15,66	45h	18%
7	T1	749,42	1	827,22	77,8	13,72	68h	18%
8	T1	749,5	1	825,44	75,94	15,92	44h	21%
9	T2	696,62	2	768,96	72,34	13,01	46h 45min	18%
10	T3	744,96	1	833,31	88,35	4,11	96h 30min	5%
11	T2	696,66	1	767,8	71,14	15,44	93h 15min	22%
12	T4	709,73	1	782,04	72,31	9,99	112h 45min	14%
13	T5	719,86	1	788,72	68,86	14,52	122h 30 min	21%
14	T4	709,35	1	781,9	72,55	5,71	161h 5min	8%

A massa inicial das amostras foi obtida através da média das pesagens de uma hora feitas após a estabilização das amostras. Nos ensaios 1, 2 e 9 foram deixadas as amostras a estabilizar dentro da câmara climática durante 24 horas e posteriormente verificou-se se havia variação da massa inferior a 0,1%. Uma vez que a variação da massa nunca foi significativa num período de 24 horas passou a usar-se a média das pesagens feitas durante uma hora para obter a massa inicial. O tempo de embebição foi o tempo que a amostra esteve dentro de água. A contagem do tempo de embebição só foi retomada quando a amostra se encontrava dentro de água. A massa após embebição representa a massa da amostra com que se inicia a secagem. A massa absorvida trata-se da diferença entre a massa de embebição e a massa inicial. A massa de água final é a massa de água ainda presente na amostra após se terminar o ensaio. Idealmente a massa de água final seria zero, mas devido à falta de tempo e à redução do fluxo de secagem (Fig 3.17 a 3.21) os ensaios foram terminados antes de atingido esse valor. O tempo de secagem é o tempo que decorre entre a colocação da amostra da câmara e o término do ensaio. Visto que o valor da massa de água final nunca foi nulo, calculou-se a percentagem de massa de água final que consiste no quociente entre a massa final e inicial de água.

3.3.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

O tempo de embebição para o tijolo cerâmico foi definido no primeiro ensaio. A amostra foi inicialmente submersa durante uma hora, e posteriormente pesada. Depois de obtidas duas medições

da massa da amostra, esta voltou a ser imersa durante mais uma hora, fazendo-se novamente duas medições da massa no final. Não se verificando uma diferença significativa entre as medições feitas após uma e duas horas de imersão, considerou-se que uma hora seria o tempo necessário para as amostras de tijolo cerâmico ficarem saturadas. Daí em diante, definiu-se para todos os ensaios com tijolo cerâmico, uma hora de imersão. Para o betão celular não impermeabilizado, foram feitos ciclos de imersão e pesagem de duas em duas horas. Verificou-se que entre as medições do segundo e do terceiro ciclos houve uma variação da massa apenas de 0,85g. A secagem iniciou-se devido à pequena variação da massa entre as medições. Por fim, para o caso do betão celular impermeabilizado, fizeram-se ciclos de imersão/pesagem de 24 horas. A secagem foi iniciada ao fim de 220 horas de imersão, sendo a variação entre as últimas pesagens de 0,7g. O tempo que foi necessário para a absorção, neste caso, deveu-se à retenção de ar nos poros, que se foi libertando lentamente. A massa de água absorvida, tal como a massa de equilíbrio, foi aproximadamente constante entre ensaios com as mesmas amostras, conforme pretendido. A percentagem de água final nas amostras está compreendida entre os 5% e os 25%. No ensaio 10 chegou-se a um valor de percentagem de água final de 5%, sendo este um valor bastante inferior à média das percentagens de água final. Esta discrepância deveu-se às condições de secagem em que o ensaio decorreu, 50% humidade relativa e 30°C, sendo estas as condições mais favoráveis à secagem. O ensaio 2, de betão celular impermeabilizado, foi concluído apesar de ainda conter 25% da massa de água absorvida, após 362 horas de secagem, porque a secagem do betão celular impermeabilizado é muito demorada. Torna-se um processo muito demorado, retirar a água do betão celular quando este é impermeabilizado. Ainda assim, o ensaio terminou durante a terceira fase de secagem e mesmo que a amostra fosse deixada a secar por mais horas a redução da massa de água seria pequena, visto que o fluxo de secagem já era muito reduzido.

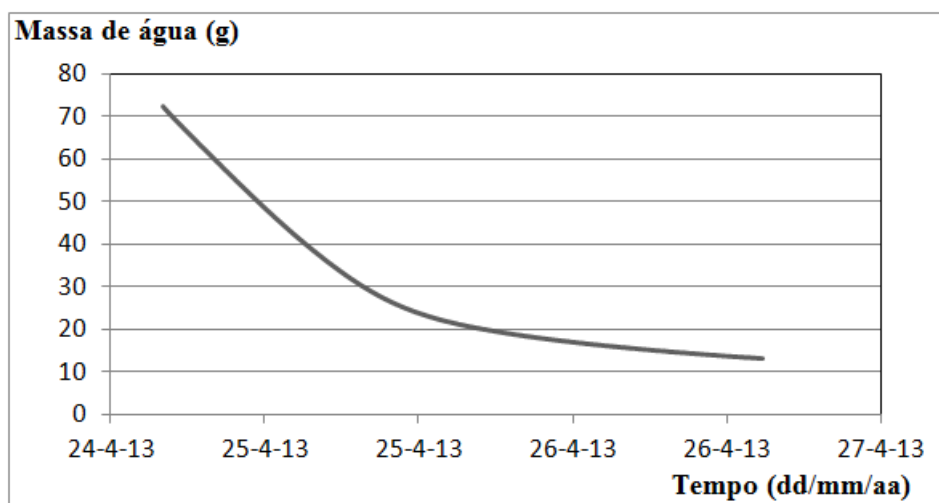


Fig.3.12 – Massa de água presente na amostra em função do tempo T-25 HR-50 tijolo cerâmico.

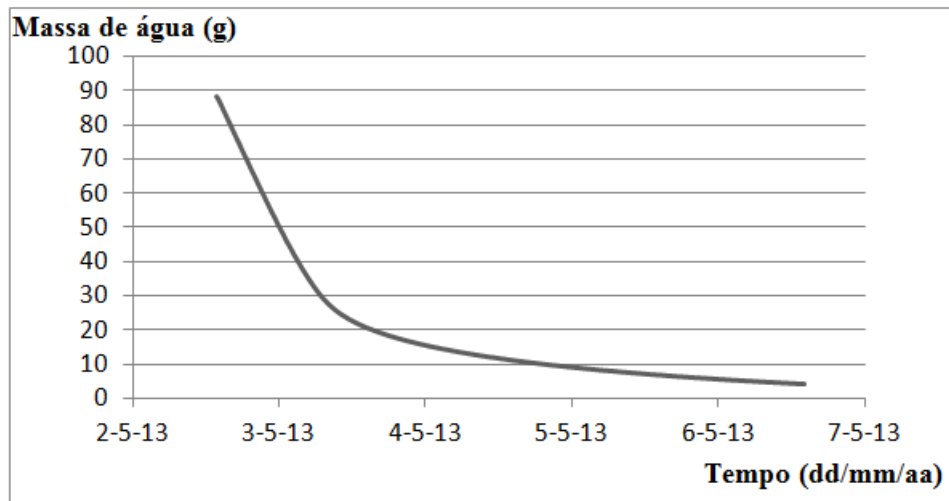


Fig.3.13 – Massa de água presente na amostra em função do tempo T-30 HR-50 tijolo cerâmico.

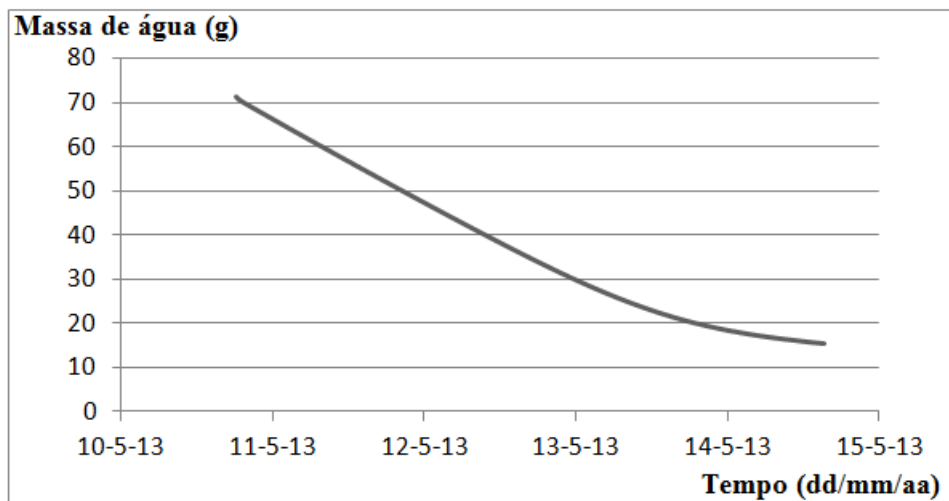


Fig.3.14 – Massa de água presente na amostra em função do tempo T-20 HR-80 tijolo cerâmico.

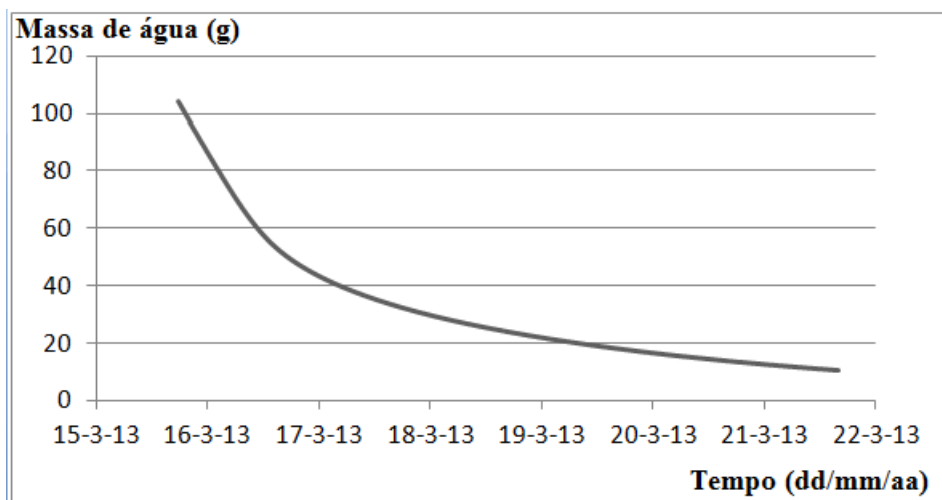


Fig.3.15 – Massa de água presente na amostra em função do tempo T-25 HR-50 betão celular.

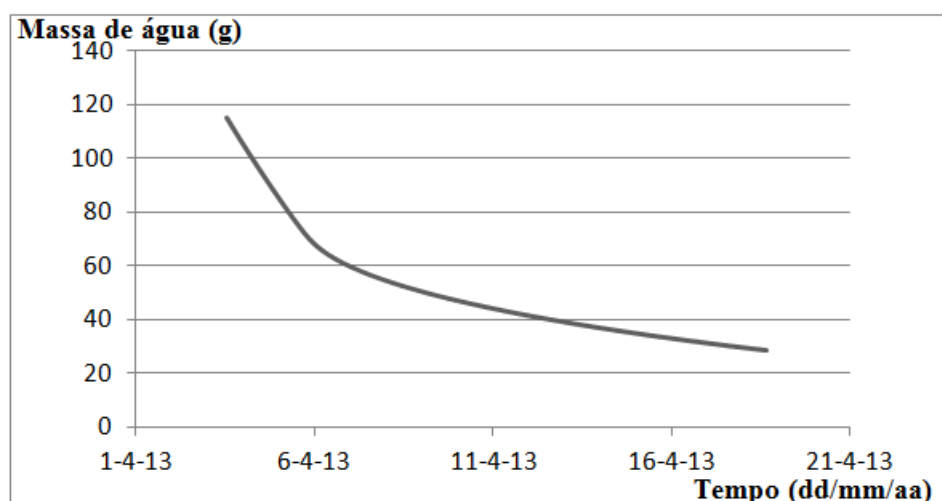


Fig.3.16 – Massa de água presente na amostra em função do tempo T-25 HR-50 betão celular impermeabilizado.

Comparando as curvas de massa de água presente na amostra em função do tempo (Fig 3.12 a 3.16), com a Fig 2.4 do capítulo 2, é possível verificar que são semelhantes, conseguindo-se distinguir as diferentes fases de secagem. Através das curvas que expressam o fluxo de secagem em função do tempo (Fig 3.17 a 3.22), e da sua comparação com a Fig. 2.3 do capítulo 2, pode-se verificar que existe uma primeira fase de secagem em que o fluxo é constante. Nesta fase inicial, o fluxo é dependente das condições de secagem e da superfície efetiva de secagem. No caso do ensaio 10 (Fig 3.17), esta fase dura aproximadamente 10 horas, sendo que para o ensaio 12 (Fig 3.20) esta dura 40 horas. Esta diferença deve-se principalmente à variação das condições de ensaio. Na segunda fase há uma redução do fluxo de secagem, até que se atinge a terceira fase de secagem, em que o fluxo já se encontra muito próximo de zero. Embora o tempo de secagem do betão celular seja mais longo do que o do tijolo cerâmico, pode-se, através das curvas de fluxo (Fig 3.21 e 3.22), observar que a duração da

primeira fase de secagem para ambos é igual. A superfície efetiva de secagem do betão é aproximada à do tijolo cerâmico. Comparando as Fig. 3.18 a 3.20, verifica-se que o fluxo de secagem é afetado quando há variações da humidade relativa e de temperatura. Na Fig 3.19 está representado o fluxo de secagem para condições de $T = 25^{\circ}\text{C}$ e de $HR = 65\%$, nesse ensaio o fluxo de secagem é aproximadamente $0,075 \text{ (kg/m}^2\text{h)}$ na primeira fase. O ensaio realizado com a mesma humidade relativa e um valor de $T = 15^{\circ}\text{C}$ já apresentou um fluxo inicial de $0,055 \text{ (kg/m}^2\text{h)}$ (Fig. 3.18), havendo desta forma uma redução de $0,02 \text{ (kg/m}^2\text{h)}$ no fluxo, devido à redução da temperatura. Na Fig. 3.20, onde a temperatura se mantém constante a 25°C e a humidade é de 80% , o fluxo na primeira fase passa a $0,04 \text{ (kg/m}^2\text{h)}$, havendo assim uma redução do fluxo, comparativamente à Fig. 3.19 de $0,035 \text{ (kg/m}^2\text{h)}$. Desta forma conclui-se que uma variação da humidade relativa de 15% tem maior impacto no fluxo de secagem que uma variação de 10°C .

Quando o valor de fluxo é mais reduzido inicialmente, a duração da primeira fase de secagem é mais longa porque a água que se encontra inicialmente à superfície do material leva mais tempo a evaporar e, enquanto houver água à superfície, o fluxo é constante.

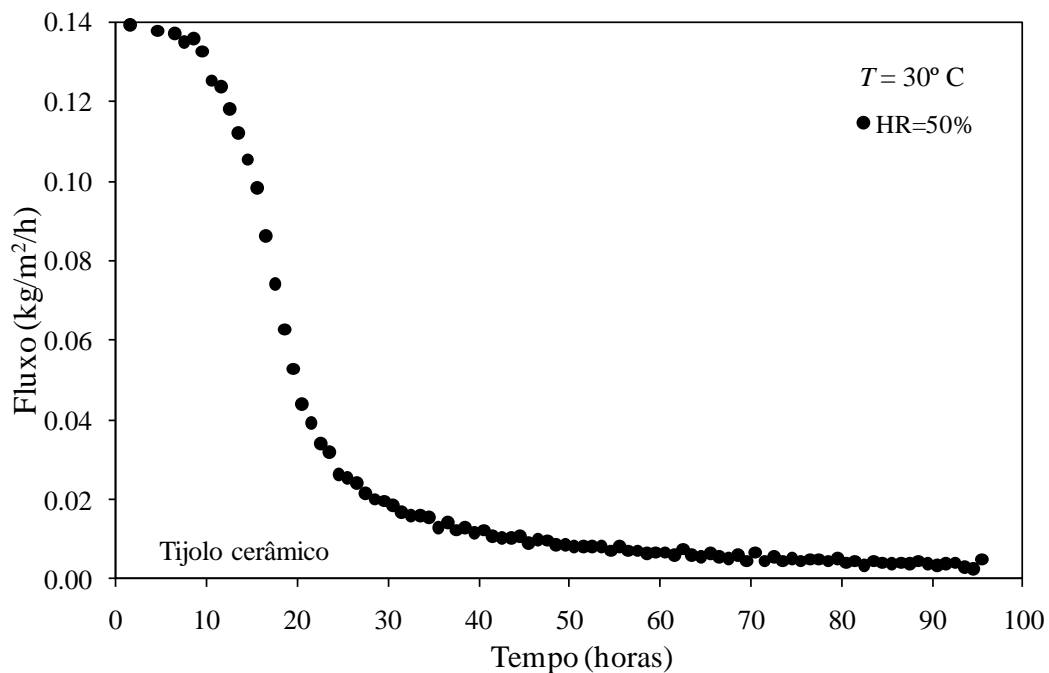


Fig.3.17 – Fluxo de secagem T-30 HR-50 tijolo cerâmico.

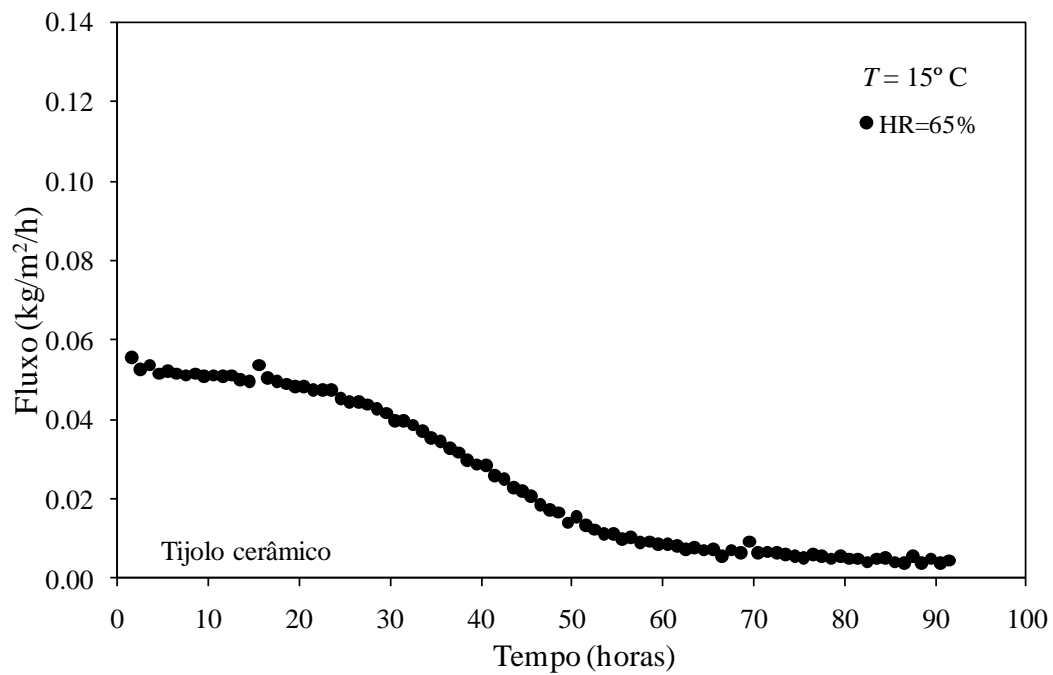


Fig.3.18 – Fluxo de secagem T-15 HR-65 tijolo cerâmico.

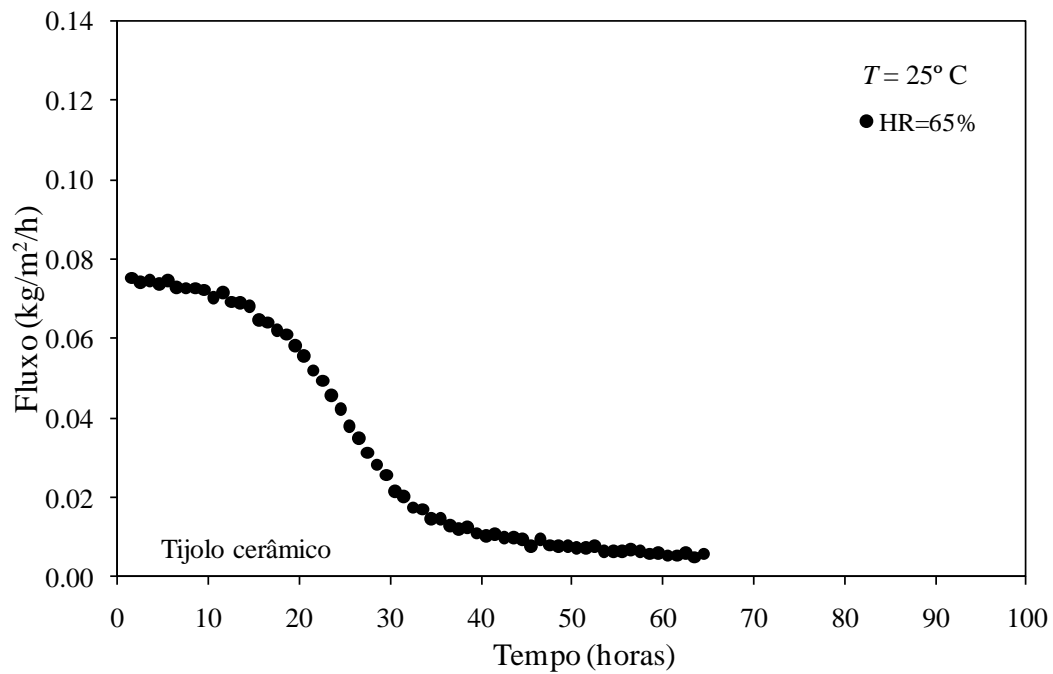


Fig.3.19 – Fluxo de secagem T-25 HR-65 tijolo cerâmico.

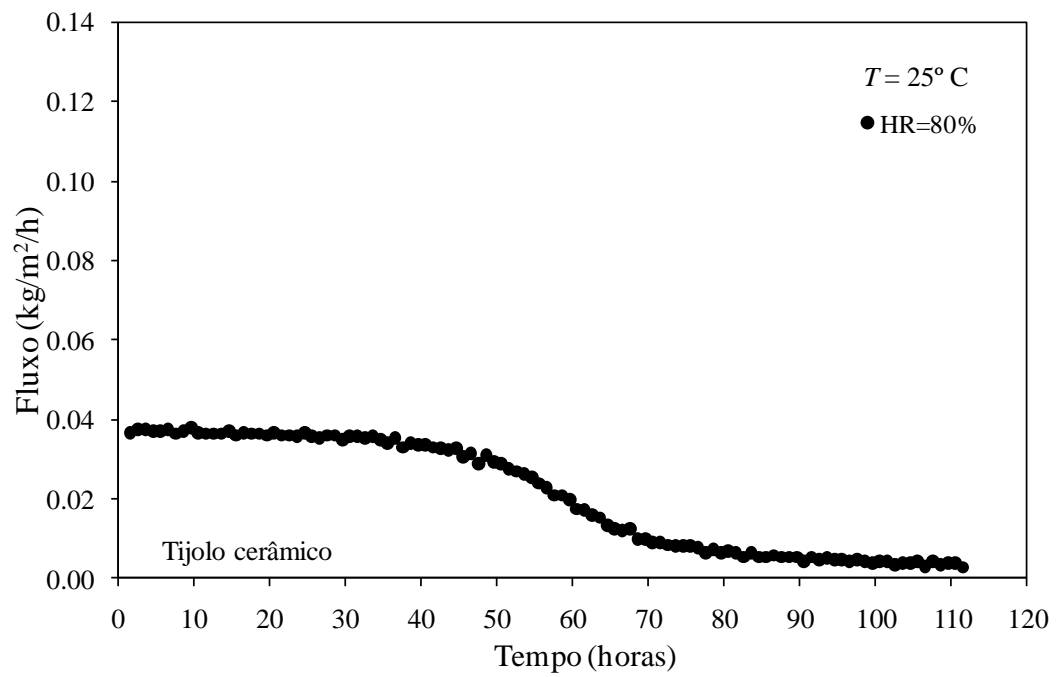


Fig.3.20 – Fluxo de secagem T-25 HR-80 tijolo cerâmico.

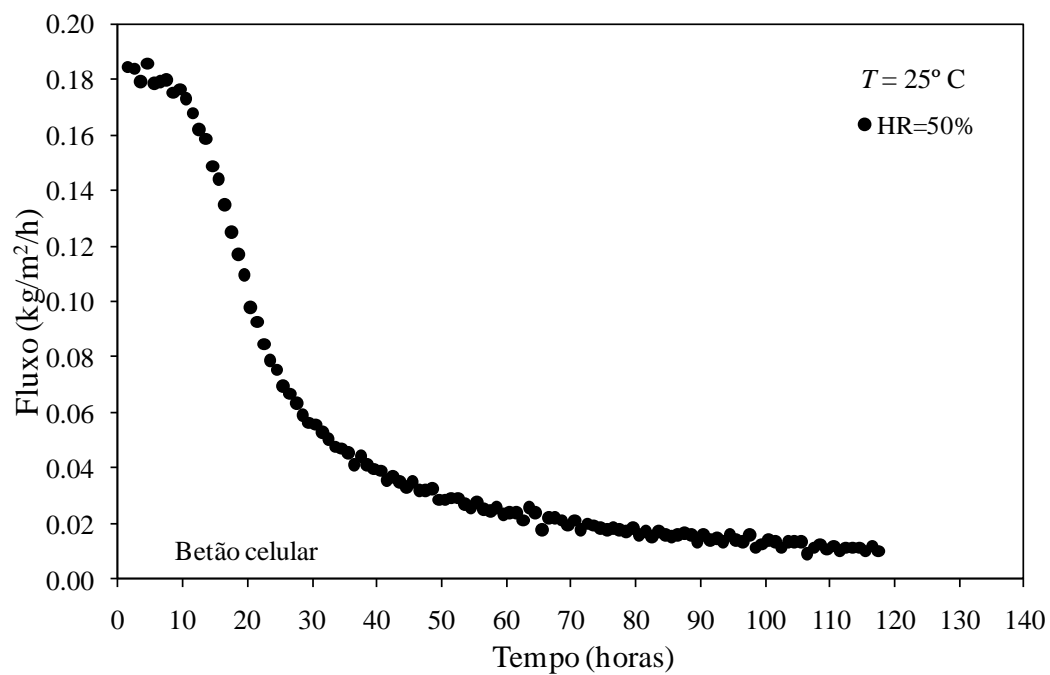


Fig.3.21 – Fluxo de secagem T-25 HR-50 betão celular.

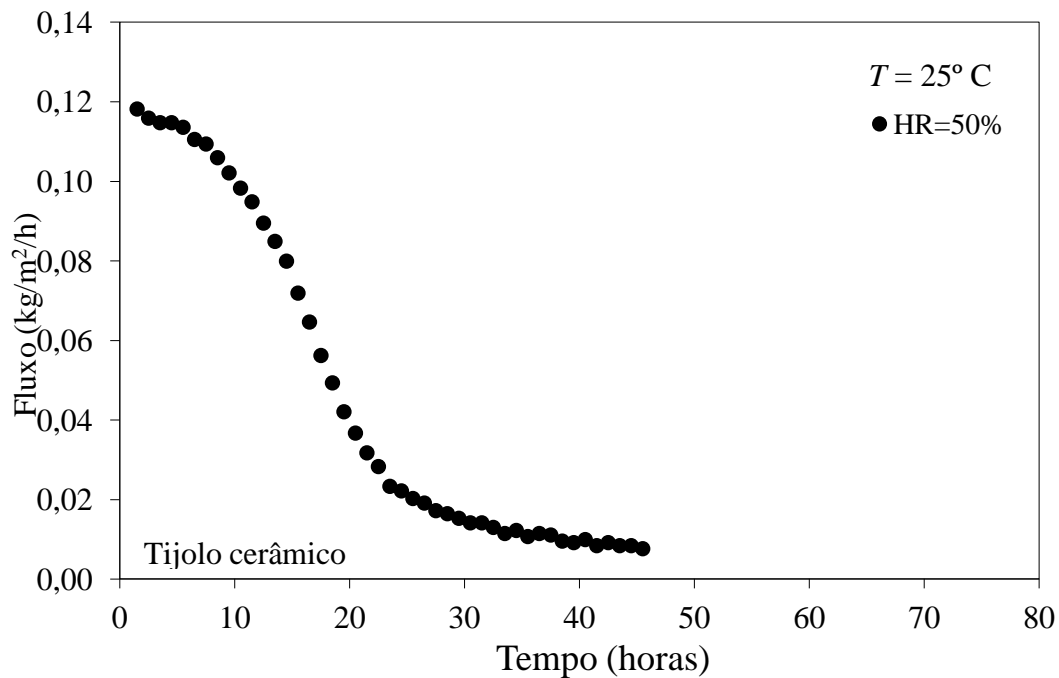


Fig.3.22 – Fluxo de secagem T-25 HR-50 tijolo cerâmico.

No caso do betão celular impermeabilizado há uma primeira fase de secagem muito longa, que se deve à menor superfície efetiva de secagem ($0,00425 \text{ m}^2$), uma vez que foi seco apenas com uma face exposta.

É importante referir que a primeira fase de secagem foi relativamente curta para todos os ensaios, comparativamente com as outras fases. Embora mais curta, é nesta fase que se verifica a maior remoção da massa de água durante o processo de secagem. Os ensaios foram todos terminados já durante a terceira fase de secagem, onde o fluxo de secagem diminui lentamente até atingir o equilíbrio.

4

ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM

4.1. CORRELAÇÃO ENTRE OS MODELOS DA CINÉTICA E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a análise da cinética de secagem foram utilizados alguns dos modelos apresentados no capítulo 3, sendo estes:

- Modelo de Newton:

$$MR = \exp(-kt) \quad (4.1)$$

- Modelo de Page:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (4.2)$$

- Modelo de Logarítmico:

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (4.3)$$

- Modelo de Midilli *et al*:

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (4.4)$$

- Modelo de Henderson-Pabis:

$$MR = a \exp(-kt) \quad (4.5)$$

- Modelo de Hii *et al*:

$$MR = a \exp(-kt^n) + b \exp(-gt^n) \quad (4.6)$$

em que:

MR – razão de humidade [-]

t – tempo [h]

k – coeficiente empírico do modelo de secagem [h⁻¹]

g – coeficiente empírico do modelo de secagem [h⁻¹]

a, b, c, n, g – constantes empíricas dos modelos de secagem [-]

Os modelos escolhidos para efetuar a análise foram alguns dos modelos mais utilizados na literatura, que, de forma geral, apresentam poucos parâmetros. O modelo de Hii *et al* [30], equação (4.6), foi exceção, apresentando um maior número de parâmetros. Este modelo é relativamente recente e foi baseado no modelo de Page e no modelo de dois termos. Dado que estes dois últimos modelos são muito conhecidos, optou-se por fazer a análise com o modelo de Hii *et al*.

Para a análise dos resultados dos ensaios, a razão de humidade experimental (MR) foi determinada através da fórmula:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (4.7)$$

em que:

MR – Razão de humidade [-]

X – Massa da amostra em função do tempo [kg]

X_e – Massa de equilíbrio da amostra [kg]

X_i – Massa inicial da amostra [kg]

Através dos modelos selecionados, foi feita a análise de resultados dos catorze ensaios efetuados, com a comparação dos valores teóricos e dos valores obtidos experimentalmente. As constantes de cada modelo foram obtidas de forma a minimizar o erro. Um maior número de constantes no modelo leva a um melhor ajuste, logo a um valor de erro menor. O erro associado a cada um dos modelos foi calculado através da equação (4.8).

Para a escolha de um modelo procurou-se, em primeiro lugar, que este apresentasse uma média de erro reduzida. Depois de se apurar quais os modelos com a média de erro mais baixa, foi comparado o seu número de parâmetros, dando preferência ao modelo que com aproximadamente o mesmo erro, possuísse o menor número de parâmetros, sendo desta forma um modelo mais simples de utilizar (Tabela 4.1).

$$Erro(\%) = \sum (MR_{exp} - MR_{teo})^2 \quad (4.8)$$

em que:

MR_{teo} – Razão da humidade teórica prevista [-]

MR_{exp} – Razão da humidade experimental [-]

Tabela 4.1 – Erro dos modelos estudados.

Ensaio	Amostra	Temperatura (°C)	% Humidade relativa	Percentagem de erro dos modelos %					
				Newton	Page	Logarítmico	Midilli et al	Henderson-Pabis	Hii et al
3	T1	15	65	93,06	79,49	34,15	4,8	91,49	3,16
4	T5	20	65	9,44	4,35	6,25	1,02	6,46	0,96
5	T5	25	65	115,32	86,88	23,14	6,79	112,37	2,13
6	T3	30	65	55,35	14,61	22,76	3,02	26,42	2,16
7	T1	15	50	125,21	81,53	19,49	6,56	116,14	1,97
8	T1	20	50	32,24	24,24	8,54	1	30,8	0,86
9	T2	25	50	94,34	59,27	11,88	4,8	87,6	1,14
10	T3	30	50	228,1	140,01	35,07	48,5	219,58	2,06
11	T2	20	80	90,25	10,19	21,69	5,14	49,13	2,36
12	T4	25	80	131,1	75,67	81,2	8,13	81,56	8,02
13	T5	15	80	42,76	23,1	105,67	4,69	30,24	2,38
14	T4	30	80	228,43	227,65	85,71	38,25	216,14	8,6
Média dos erros:				103,8	68,92	37,96	11,06	88,99	2,98
Média corrigida:							4,60		

Os modelos de Newton e de Henderson-Pabis foram os modelos que apresentaram piores resultados. O modelo de Page, embora ligeiramente melhor que os dois anteriores, também apresentou resultados pouco satisfatórios.

O modelo de Hii *et al.* foi o que apresentou a menor média de erros para o tijolo cerâmico (2,98%), sendo seguido pelos modelos de Midilli *et al.* e Logarítmico. Dos três modelos, o Logarítmico teve uma média de erros significativamente maior. Foi calculada uma média corrigida para o modelo de Midilli *et al.* na qual não foram incluídos os ensaios 10 e 14. Os ensaios que foram retirados, apresentaram um valor de erro excessivo em relação à média dos erros. Estes foram ambos realizados a 30°C o que poderá indiciar que o modelo apresenta problemas para temperaturas mais altas. O valor do erro corrigido foi de 4,60%, pelo que a diferença entre a média corrigida dos erros de Midilli *et al.* e a média dos erros de Hii *et al.* foi de apenas 1,62%. O modelo de Hii *et al.* possui mais parâmetros para serem ajustados do que o modelo de Midilli *et al.*, desta forma o erro é evidentemente menor. A resolução torna-se mais complexa, e os ganhos, em termos de redução do erro são pequenos. Desta forma, o modelo selecionado foi o modelo de Midilli *et al.*

Para todos os ensaios fez-se a comparação entre as curvas experimentais obtidas através da equação (4.7), com as curvas teóricas obtidas através do modelo de Midilli *et al.*, representado por uma linha a vermelho nas Fig. 4.1 a 4.14. Nestas figuras é apresentada a variação da percentagem de água no material ao longo do tempo, sendo que para $t=0$ o valor é 1 (100%).

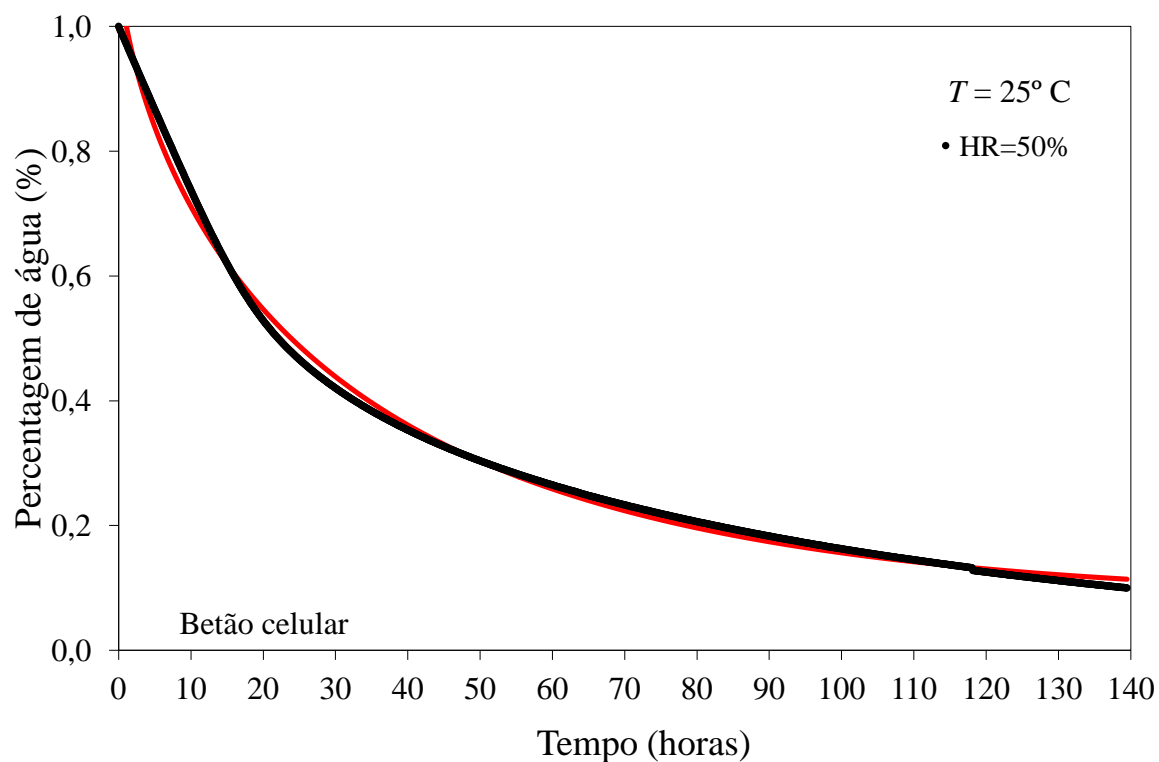


Fig.4.1 – Curva experimental e teórica do ensaio 1.

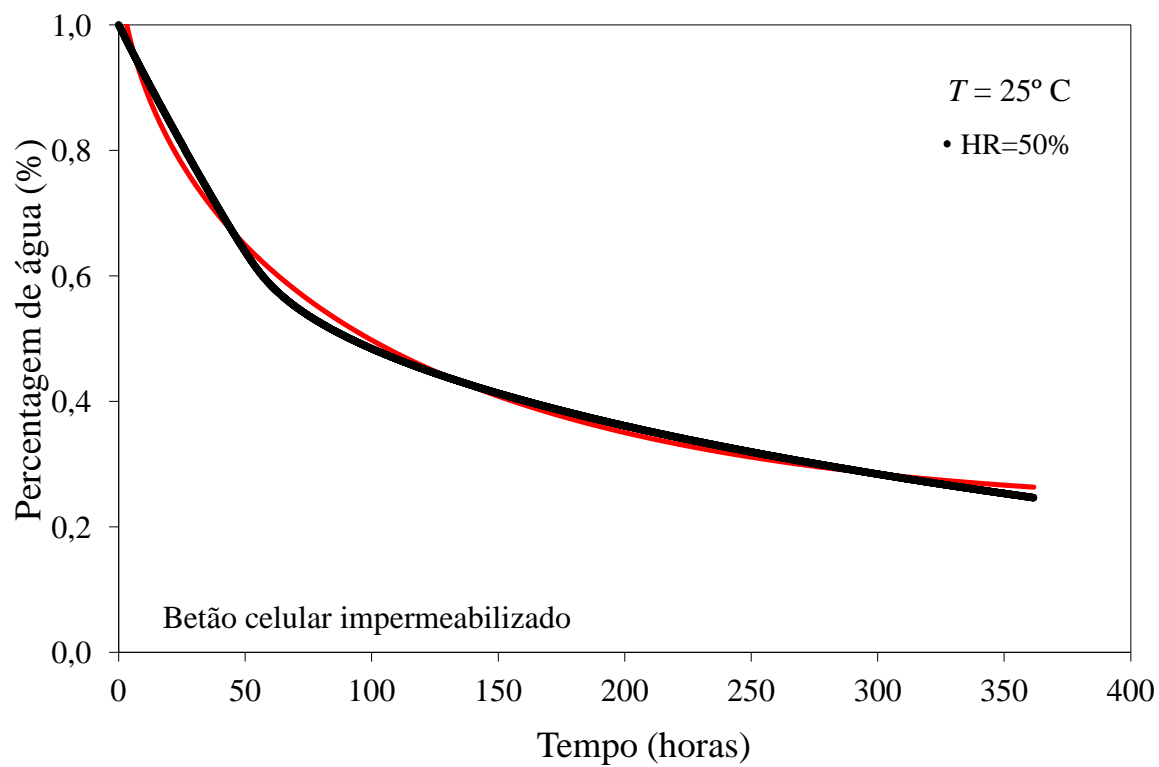


Fig.4.2 – Curva experimental e teórica do ensaio 2.

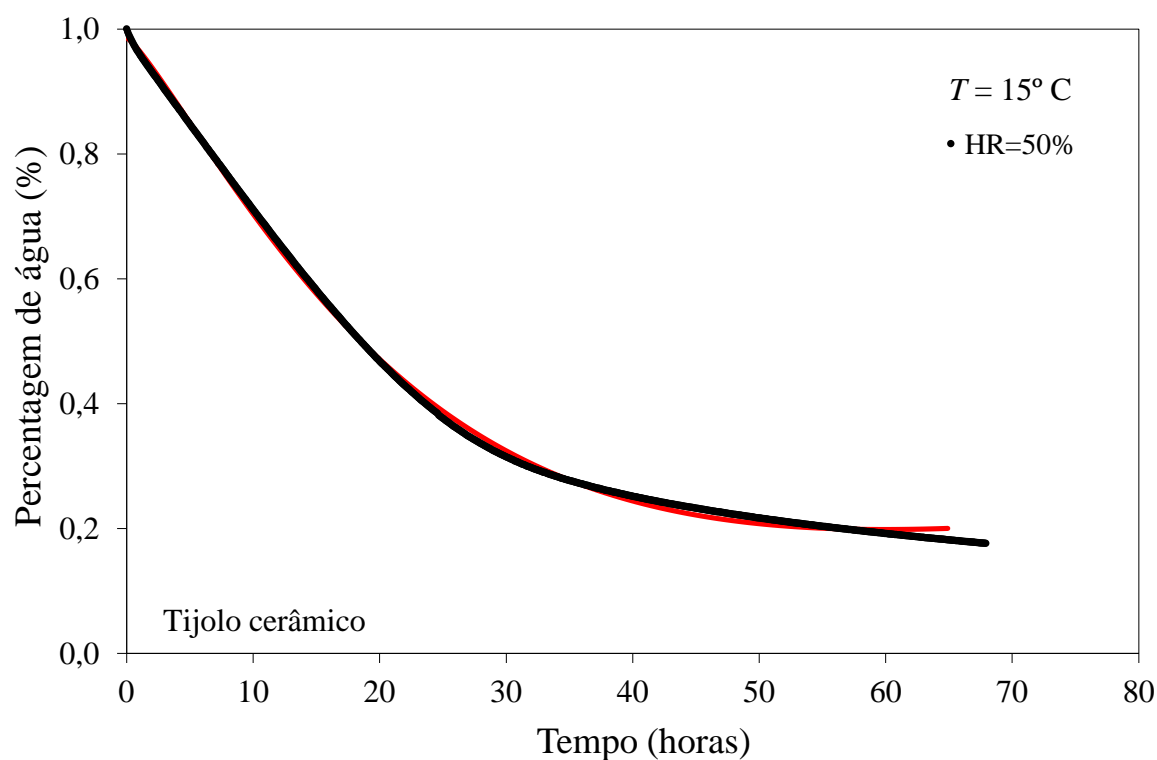


Fig.4.3 – Curva experimental e teórica do ensaio 7.

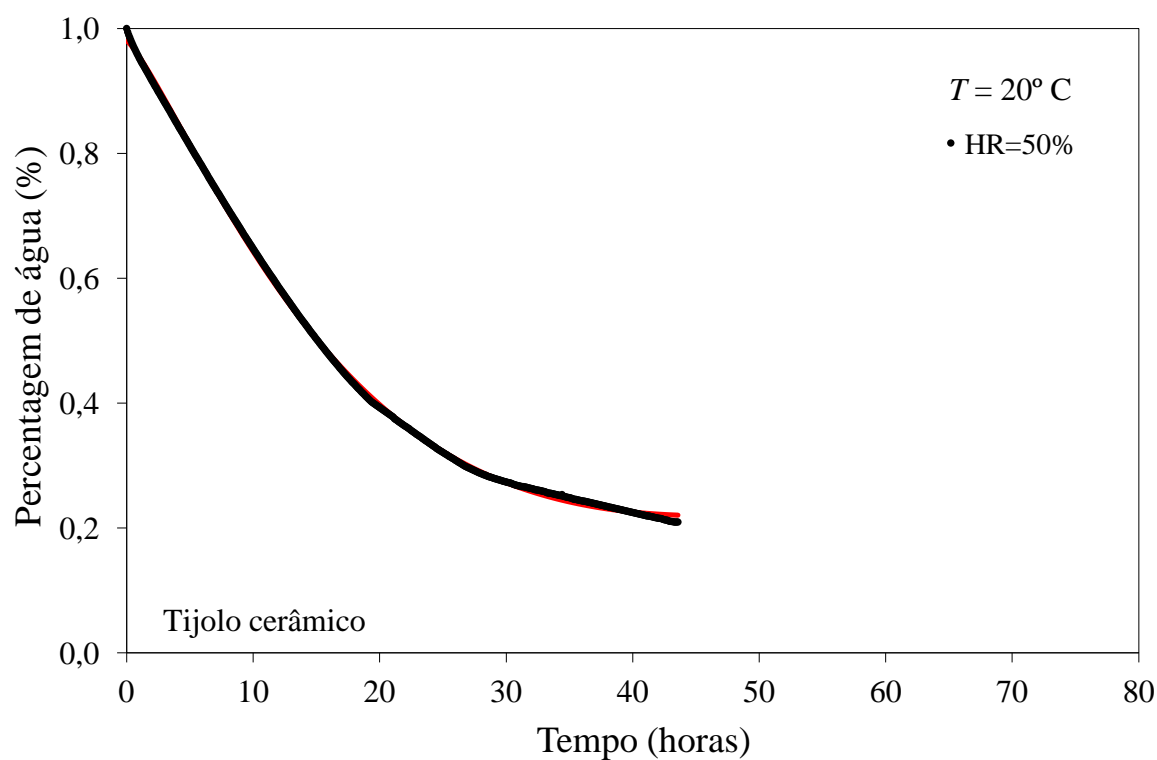


Fig.4.4 – Curva experimental e teórica do ensaio 8.

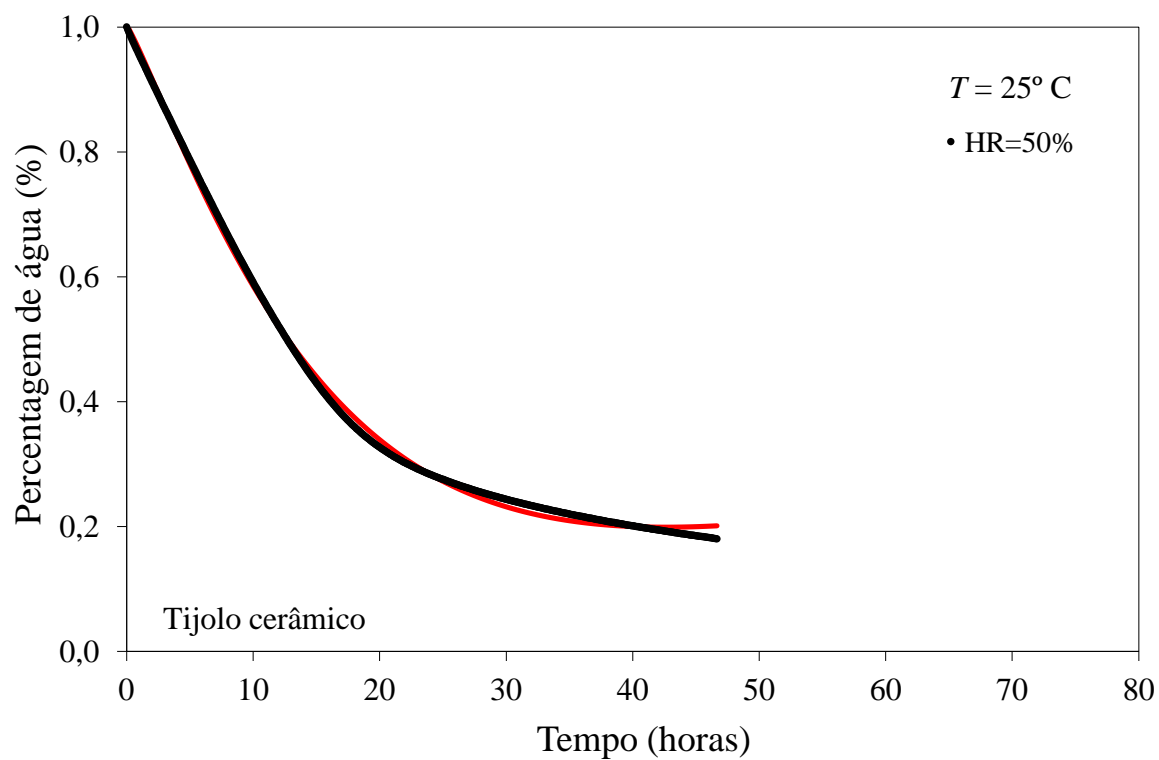


Fig.4.5 – Curva experimental e teórica do ensaio 9.

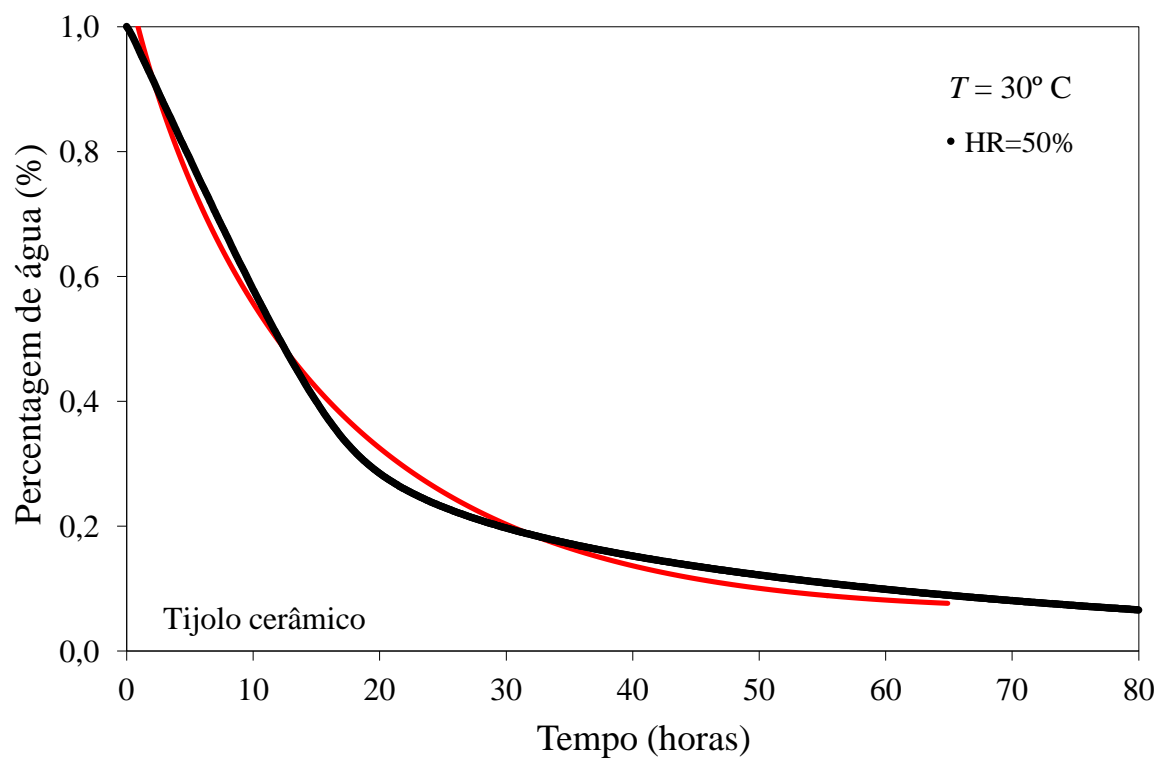


Fig.4.6 – Curva experimental e teórica do ensaio 10.

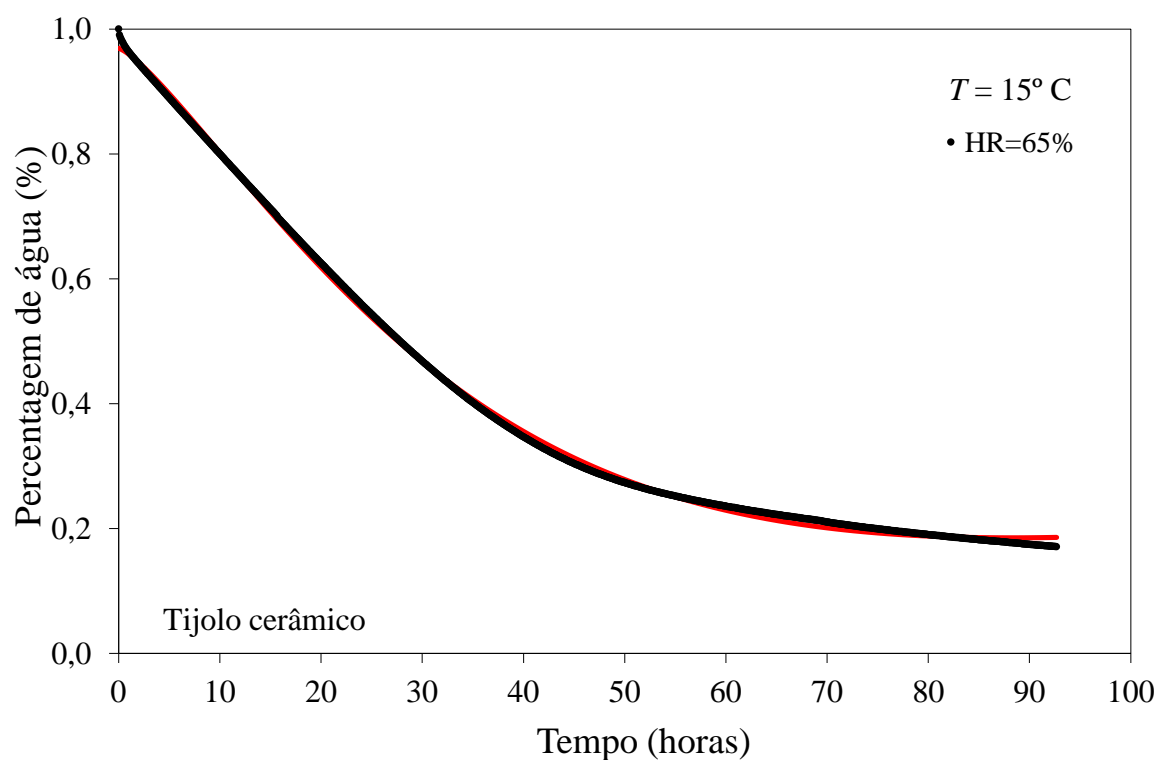


Fig.4.7 – Curva experimental e teórica do ensaio 3.

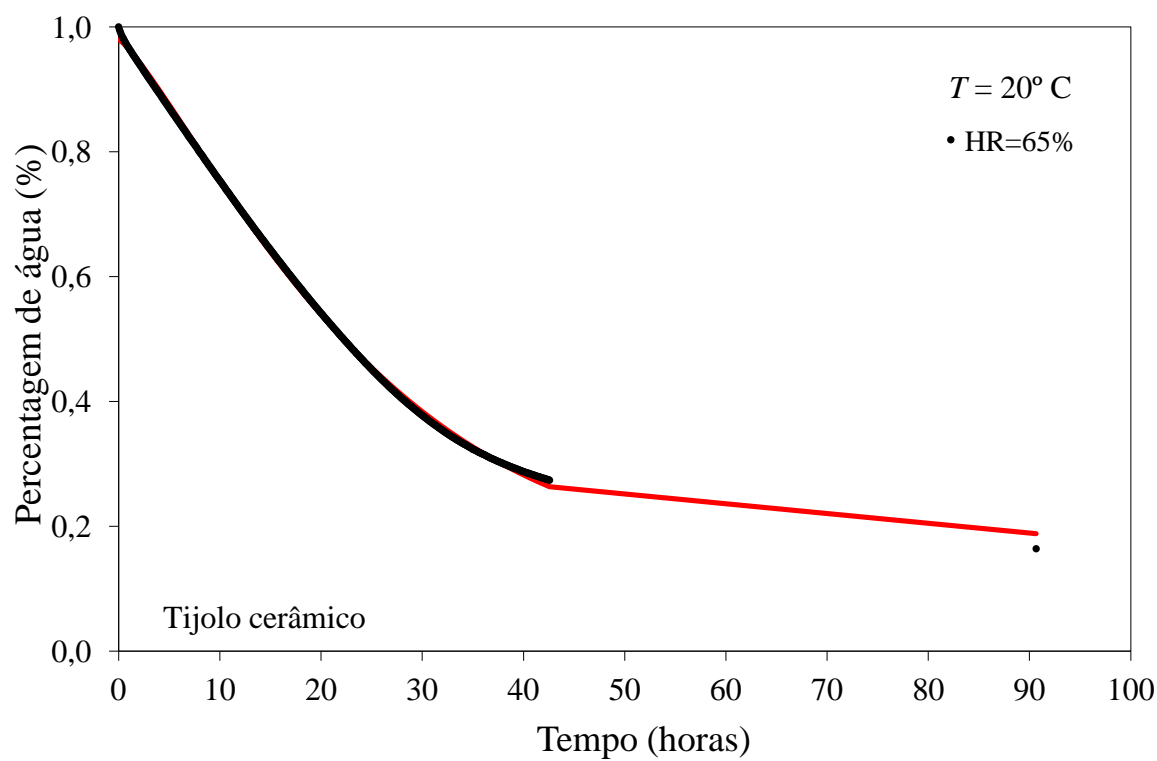


Fig.4.8 – Curva experimental e teórica do ensaio 4.

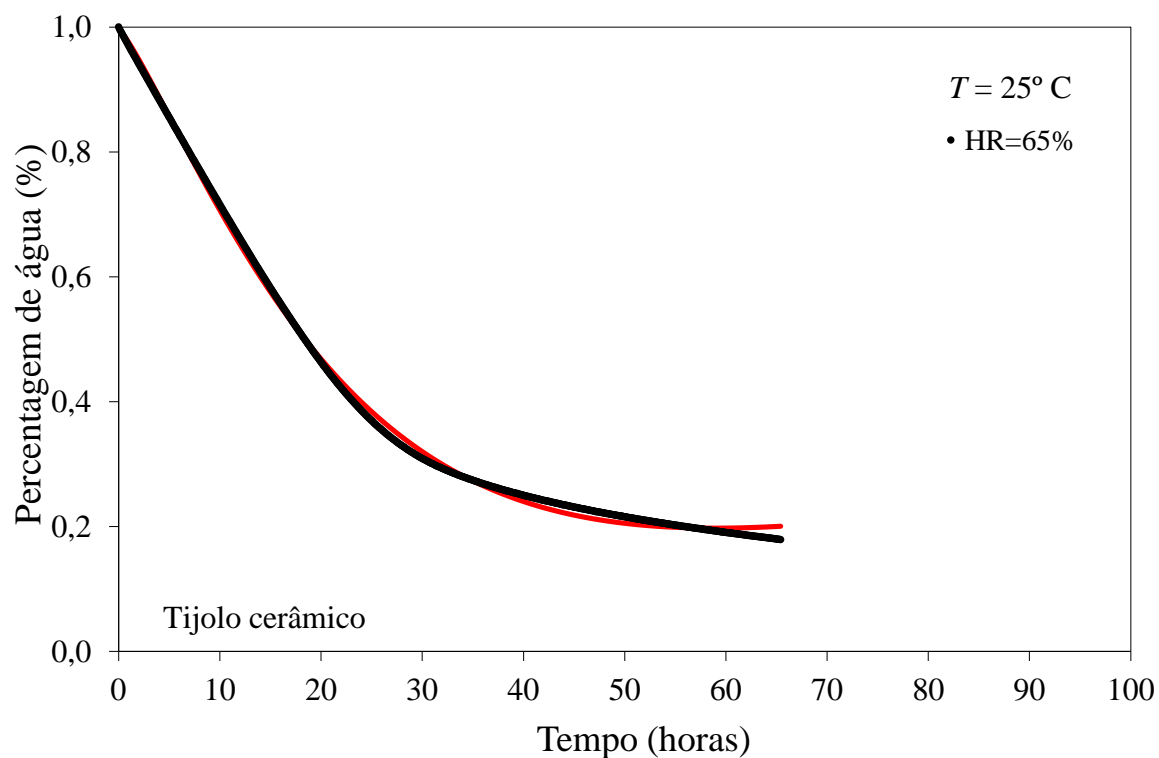


Fig.4.9 – Curva experimental e teórica do ensaio 5.

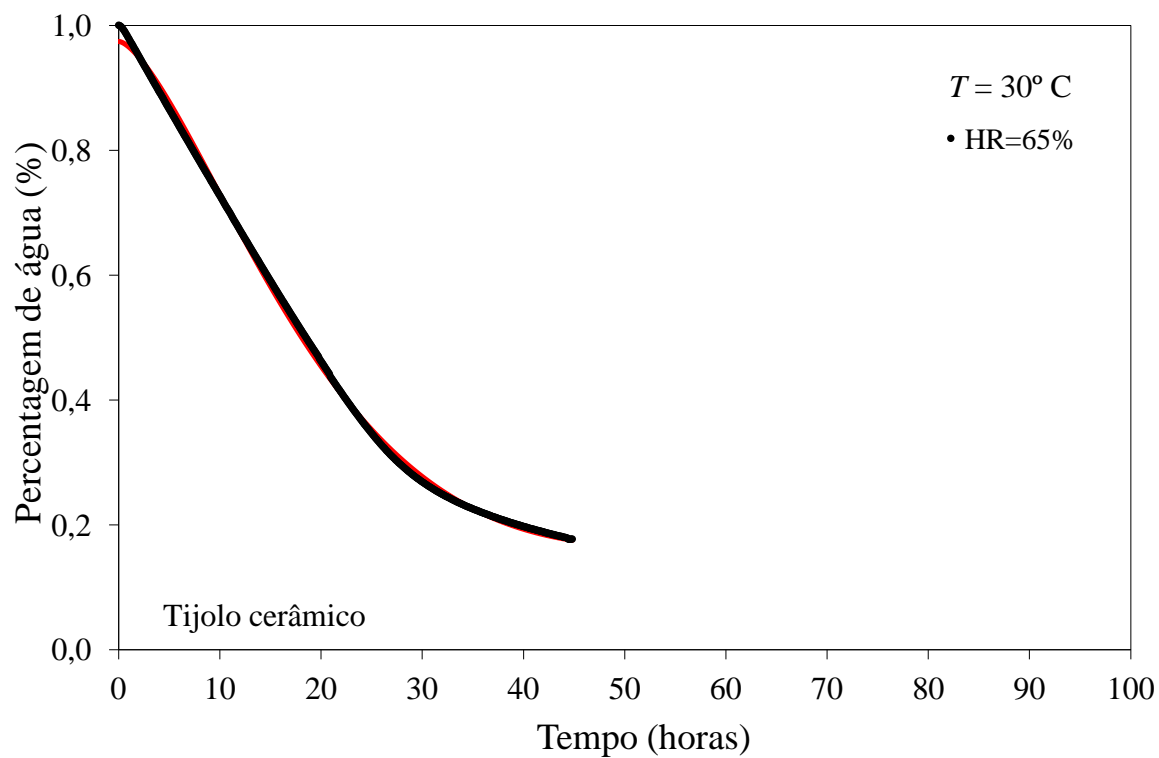


Fig.4.10 – Curva experimental e teórica do ensaio 6.

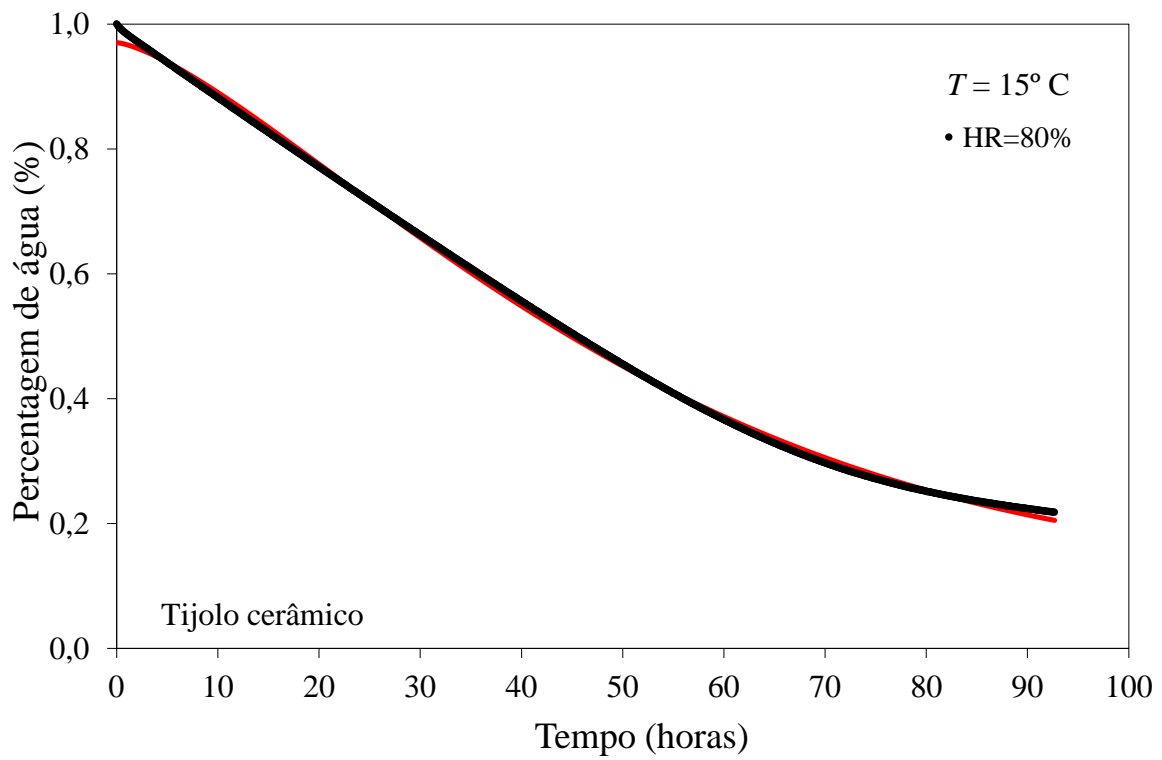


Fig.4.11 – Curva experimental e teórica do ensaio 13.

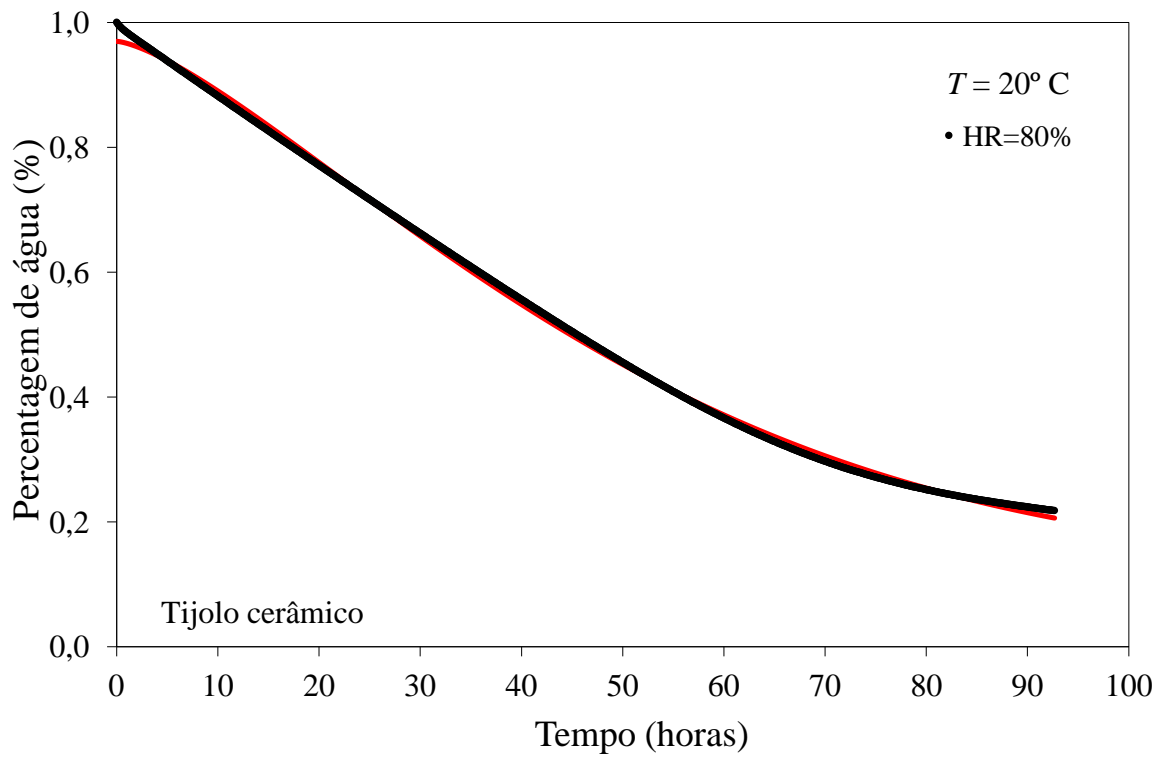


Fig.4.12 – Curva experimental e teórica do ensaio 11.

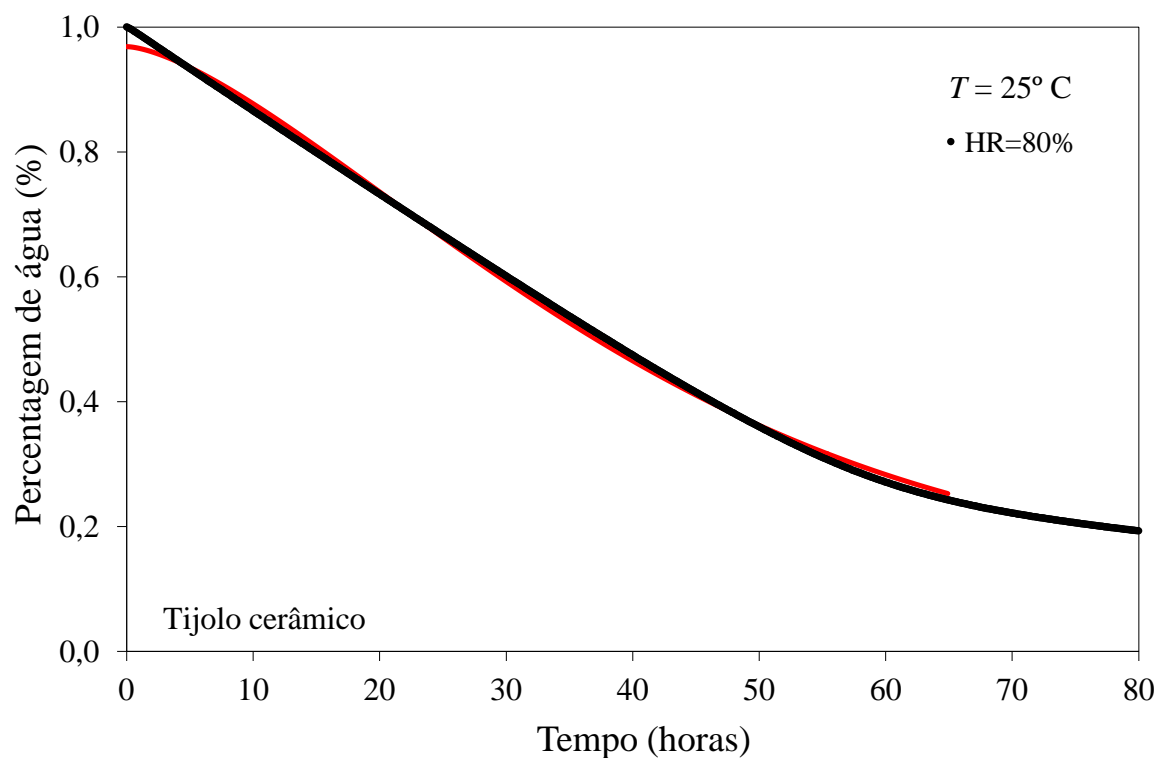


Fig.4.13 – Curva experimental e teórica do ensaio 12.

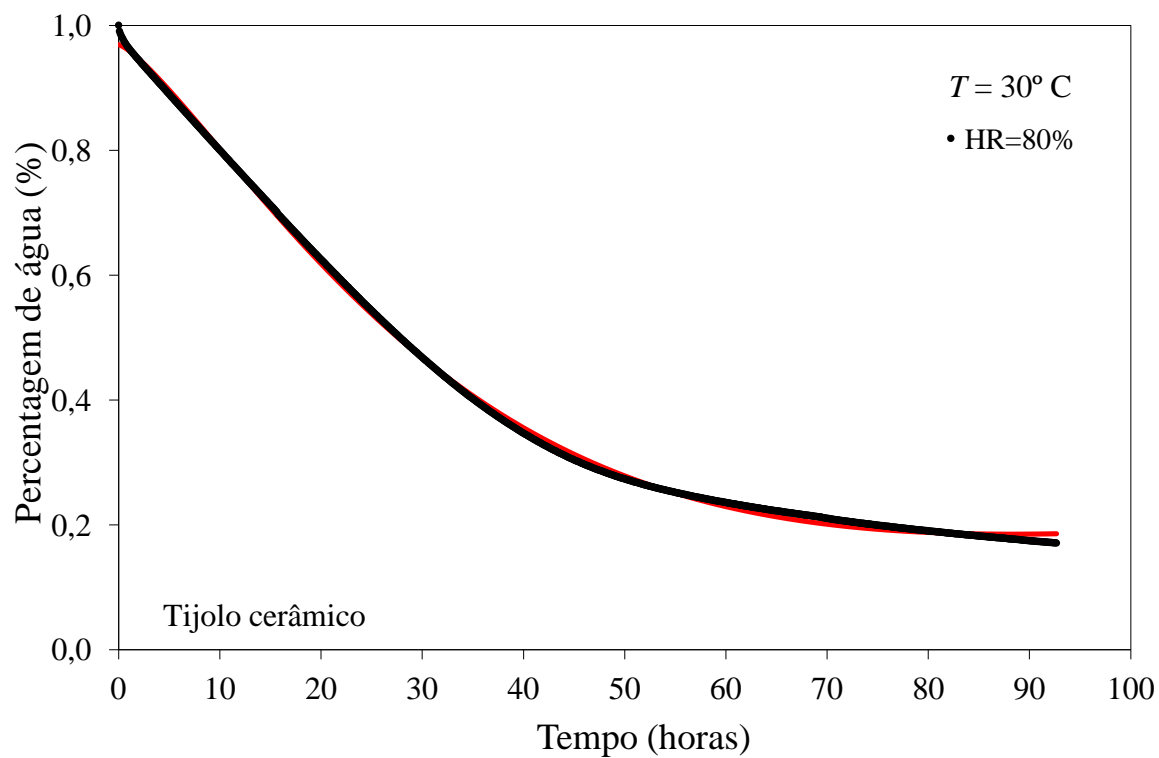


Fig.4.14 – Curva experimental e teórica do ensaio 14.

Os tempos de secagem podem ser obtidos através da constante de secagem através da seguinte equação:

$$t_c = \frac{1}{k} \quad (4.9)$$

Tabela 4.2 – Constante de secagem k e tempo de secagem t_c do modelo Midilli *et al.*

Ensaio	Amostra	Temperatura (°C)	% Humidade relativa	Constante de secagem K (h^{-1})	Tempo de Secagem, t_c (h)
3	T1	15	65	0,012	86,956
4	T5	20	65	0,017	57,364
5	T5	25	65	0,024	41,204
6	T3	30	65	0,012	85,088
7	T1	15	50	0,024	41,404
8	T1	20	50	0,03	33,296
9	T2	25	50	0,044	22,87
10	T3	30	50	0,06	16,73
11	T2	20	80	0,004	245,092
12	T4	25	80	0,006	168,043
13	T5	15	80	0,004	245,449
14	T4	30	80	0,011	91,197

Concluimos que um aumento da temperatura implica um aumento da constante de secagem k e, consequentemente, uma diminuição do tempo de secagem t_c . Ocorreu uma discrepância no ensaio 6, também para uma temperatura de 30°C, em que houve um aumento de t_c quando este deveria cair com o aumento da temperatura. O ensaio não foi repetido por uma questão de prazos. Como já referido anteriormente o modelo aparenta não ser compatível com as temperaturas mais altas. O aumento da humidade relativa levou a uma redução do k , logo a um aumento do tempo de secagem. Houve um maior impacto no tempo de secagem com a variação da humidade relativa do que com a alteração da temperatura.

Freitas [2] determinou, para o betão celular e para o barro vermelho, os valores de difusividade hídrica (D_w) e os valores de difusividade higrotérmica (D_t). Este autor verificou ainda que os valores de D_t foram muito inferiores aos valores de D_w , pelo que a influência da temperatura nos fenómenos de transferência de humidade é menor [2]. Pode concluir-se desta forma que houve concordância com os resultados obtidos.

4.2. COMPARAÇÃO DOS DOIS MATERIAIS ANALISADOS

Foi feita a comparação da secagem entre a amostra de betão celular impermeabilizada, a amostra de betão celular não impermeabilizada e uma amostra de tijolo cerâmico em condições de temperatura e humidade relativa constantes (Fig. 4.15).

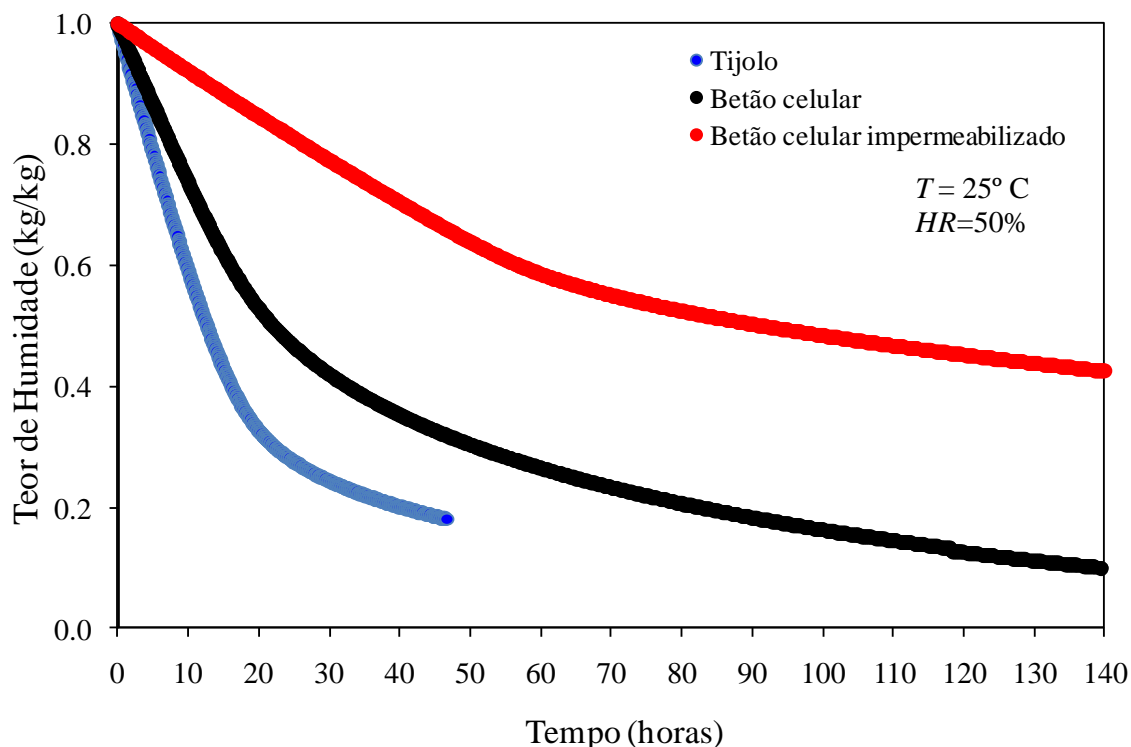


Fig.4.15 – Curvas de secagem dos materiais estudados.

Como esperado o betão celular impermeabilizado levou muito tempo a secar, atingindo 25% da água absorvida após 362h. Após 140h a secar este ainda apresentava cerca de 43% da água absorvida inicialmente, enquanto que o betão celular não impermeabilizado apresentava 10%. Comparando os resultados das três amostras ao fim de 47h a secar, constatou-se que o tijolo cerâmico continha 18% do valor de água inicial, o betão celular 32%, e o betão celular impermeabilizado 66%. Desta forma conclui-se que o betão celular embora muito poroso retém a água no seu interior, tal como na absorção em que este retém ar no seu interior que liberta lentamente.

O tijolo cerâmico, tal como observado na Fig. 4.15, foi o que demorou menos tempo a secar. Este é um material poroso, sendo a dimensão dos seus poros inferior à dimensão dos poros do betão celular. A dimensão excessivamente grande dos poros do betão celular, tal como a sua estrutura porosa fechada poderão ser a razão da maior dificuldade em secar. Este material armazena água nos seus espaços vazios e devido aos poros excessivamente grandes a água apresenta dificuldade em, através do fenómeno de capilaridade, deslocar-se por estes.

4.3. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO DE ARRHENIUS

Como referido no Capítulo 2, na determinação da energia de ativação e a constante de Arrhenius dos provetes de tijolo maciço foi aplicada a equação de Peleg [36]:

$$MR = 1 - \frac{t}{k_1 + t.k_2} \quad (4.9)$$

em que:

MR – razão de humidade [-]

t – tempo [h]

k_1 – constante que descreve a taxa de secagem associada ao modelo de Peleg [h]

k_2 – constante de capacitância do modelo de Peleg [-]

Como a constante da taxa de secagem associada ao modelo de Peleg (k_1) descreve a taxa de desabsorção (R_0) no início do processo de secagem ($t=0$), a relação entre $1/k_1$ e a temperatura de secagem podem ser obtidas através da equação linearizada de Arrhenius:

$$\ln\left(\frac{1}{k_1}\right) = \ln(A_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (4.10)$$

em que:

k_1 – constante que descreve a taxa de secagem associada ao modelo de Peleg [h]

A_0 – constante de Arrhenius [m^2/s]

E_a – Energia de ativação [kJ/mol]

R – constante universal dos gases ideais [kJ/mol.K]

T – Temperatura [°C]

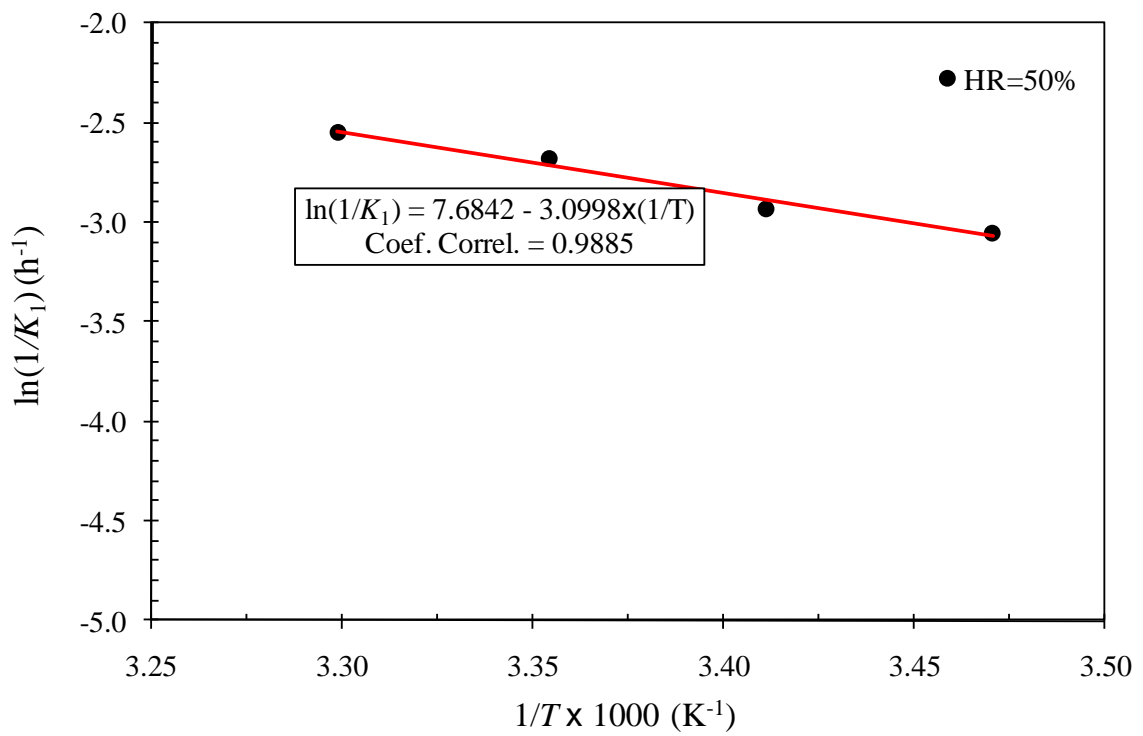


Fig.4.16 – Representação gráfica da taxa de secagem em função da temperatura de secagem, para $\text{HR}=50\%$.

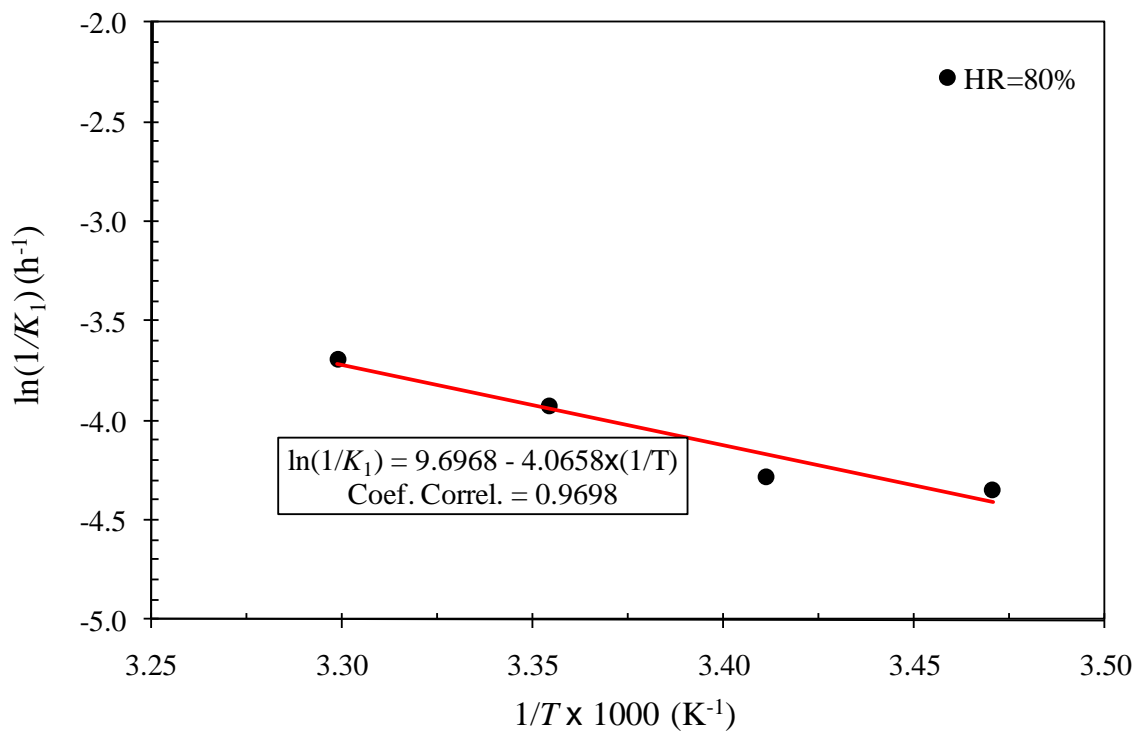


Fig.4.17 – Representação gráfica da taxa de secagem em função da temperatura de secagem, para $\text{HR}=80\%$.

Com recurso à equação (4.10) e aos gráficos apresentado nas Figuras 4.16 e 4.17, foi possível determinar a energia de ativação necessária para o processo de transferência de vapor de água:

$$E_a = -\text{declive} \cdot R \quad (4.11)$$

Em que R é a constante universal dos gases ideais ($R=8,31447 \text{ J/mol K}$).

Deste modo a energia de ativação de Arrhenius necessária para se realizarem as trocas de vapor de água entre provete de tijolo maciço e o meio ambiente é de 25,77 kJ/mol para 50% de humidade relativa e 33,81 kJ/mol para 80% de humidade relativa. Verifica-se um aumento da energia de ativação com o aumento da humidade relativa.

Os valores obtidos para a energia de ativação de Arrhenius não poderam ser comparados com outros valores por não existirem referências na literatura. Não foi encontrado na literatura nenhum estudo que determinasse coeficientes de difusividade ao vapor e energia de ativação com o material de construção neste trabalho, tijolo maciço.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a secagem de materiais de construção porosos. Foi necessário para tal conhecer os mecanismos de transferência de humidade em materiais e principalmente as fases de secagem para materiais porosos.

Os ensaios realizados permitiram:

- Através de modelos da cinética de secagem, descreveu-se a secagem de tijolo cerâmico e do betão celular. Foram escolhidos seis modelos para analisar, posteriormente selecionou-se o modelo que apresentava os valores teóricos mais próximos dos valores resultantes dos ensaios. O modelo escolhido foi o de Midilli *et al.* Embora este modelo apresente um erro ligeiramente superior ao modelo de Hii *et al.*, foi relevante para a decisão o facto do modelo de Midilli *et al.* possuir menos uma constante, sendo assim de mais fácil resolução. Desta forma para a escolha do modelo considerou-se para além da dispersão do mesmo em relação aos resultados, o número de constantes dos modelos.
- Analisar a influência dos fatores externos (humidade relativa e temperatura) no tempo de secagem dos materiais. Um aumento da temperatura levou a um valor da constante de secagem k mais elevado, e conseqüentemente à redução do tempo de secagem t_c . Um aumento da humidade relativa levou a que o valor da constante de secagem decrescesse, logo houve um aumento do tempo de secagem.
- Com recurso às curvas de fluxo, observar que uma variação de 65% de humidade relativa para 80% de humidade relativa, resulta numa maior redução do fluxo de secagem do que uma diminuição da temperatura de 25°C para 15°C. Podemos ainda através da análise da variação da constante de secagem k , e do tempo de secagem t_c (obtidos através do modelo de Midilli *et al.*), observar que a variação destas constantes é mais sensível à variação da humidade relativa do que à variação da temperatura. Daí conclui-se que a humidade relativa tem maior peso na secagem que a temperatura.
- Comparar a secagem de amostras de betão celular impermeabilizado, betão celular não impermeabilizado, e de tijolo cerâmico, para condições de temperatura e humidade relativa constantes, verificando-se que o tempo de secagem para o betão celular impermeabilizado é o mais longo e o tempo de secagem do tijolo cerâmico maciço é o mais curto das três.
- Obter os valores da energia de ativação de Arrhenius do tijolo cerâmico para os valores de humidade relativa de 50% e de 80%.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho dão um pequeno contributo para o estudo da cinética de secagem em materiais de construção. Visto a cinética aplicada à construção ainda não ser muito estudada, este trabalho poderá ainda ser um incentivo à realização de mais estudos nesta área.

Poderá ser abordado por estudos futuros o seguinte:

- Influência da velocidade do ar na secagem de materiais porosos.
- Estudo da influência dos ciclos de molhagem na secagem dos materiais.
- Utilização de amostras de outros materiais usados na construção civil.
- Conceção de modelos da cinética de secagem.
- Realização de análises com o uso de outros modelos da cinética de secagem.
- Analisar a influência das diferentes dimensões da amostra na cinética de secagem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rodrigues, A.M. "Humidades Em Edifícios." (2008).
- [2] FREITAS, V. P. Transferência De Humidade Em Paredes De Edifícios Análise Do Fenómeno De Interface. 1992.
- [3] Zhong, Zhipeng. "Combined heat and moisture transport modeling for residential buildings." United States -- Indiana 2008.
- [4] BARREIRA, E. S. B. M. Degradação Biológica De Fachadas Com Sistemas De Isolamento Térmico Pelo Exterior Devida Ao Desempenho Higrotérmico. Dissertação De Doutorado, Feup. (2010).
- [5] Dincer, Ibrahim, and Sadik Dost. "A Modelling Study for Moisture Diffusivities and Moisture Transfer Coefficients in Drying of Solid Objects." *International Journal of Energy Research* 20, no. 6 (1996): 531-39.
- [6] SOUSA, J. M. M. S. Caracterização Da Capilaridade De Revestimentos De Fachada. (1996).
- [7] Thosmas Bednar, Dipl. - Ing. Dr.techn. "Approximation of Liquid Moisture Transport Coefficient of Porous Building Materials by Suction and Drying Experiments Demands of Determination of Drying Curve." (2002)
- [8] Van Belleghem, M., L. De Backer, A. Janssens, and M. De Paepe. "Conjugate Modelling of Convective Drying Phenomena in Porous Building Materials." Paper presented at the 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2012), 4-7 Sept. 2012, UK, 2012.
- [9] Krischer, O, and K Kroell. "Technique Du Séchage." (1978).
- [10] CASTRO, J. M. F. "Estudo Experimental Da Secagem Do Betão Celular." (1998).
- [11] Brito, Vânia Patrícia Santos. "Influência Dos Revestimentos Por Pintura Na Secagem Do Suporte." (2009).
- [12] Karoglou, M. "Water Sorption Isotherms of Some Building Materials." *Drying technology* 23, no. 1-2 (2005): 289-303.
- [13] FREITAS, V. P. Humidade Ascensional. 2008.
- [14] Holm, Andreas H, and Hartwig M Kuenzel. "Practical Application of an Uncertainty Approach for Hygrothermal Building Simulations—Drying of an Aac Flat Roof." *Building and environment* 37, no. 8 (2002): 883-89.
- [15] Holm, Andreas, and Hartwig M Künzel. "Non-Isothermal Moisture Transfer in Porous Building Materials." Paper presented at the Proceedings of the materials week 2000, International congress on advanced materials, their processes and applications, 2000.
- [16] SANTOS, A. M. S. "Modelos Numéricos De Transferência De Calor E De Massa Com Aplicação À Secagem." (1992).
- [17] Künzel, Hartwig M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. IRB-Verlag, 1995.
- [18] Moropoulou, A., M. Karoglou, A. Giakoumaki, M. K. Krokida, Z. B. Maroulis, and G. D. Saravacos. "Drying Kinetics of Some Building Materials." *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 22, no. 2 (2005): 203-08.

- [19] Sazhin, BS. "Principles of Drying Techniques." Khimiya, Moscow (1984): 320.
- [20] Panchariya, PC, D Popovic, and AL Sharma. "Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying Process." *Journal of food engineering* 52, no. 4 (2002): 349-57.
- [21] Kuitche, A, M Edoun, and G Takamte. "Influence of Pre-Treatment on Drying on the Drying Kinetic of a Local Okro (*Hibiscus Ersculentus*) Variety." *World Journal of Dairy & Food Sciences* 2, no. 2 (2007): 83-88.
- [22] Crank, J. "The Mathematics of Diffusion, 2nd Edn. Clarendon." New York (1975).
- [23] Kuitche, A, M Edoun, and G Takamte. "Influence of Pre-Treatment on Drying on the Drying Kinetic of a Local Okro (*Hibiscus Ersculentus*) Variety." *World Journal of Dairy & Food Sciences* 2, no. 2 (2007): 83-88.
- [24] Marinos-Kouris, Dimitris, and ZB Maroulis. "Transport Properties in the Drying of Solids." *Handbook of industrial drying* 1 (1995): 113-59.
- [25] Karoglou, M, A Moropoulou, ZB Maroulis, and MK Krokida. "Drying Kinetics of Some Building Materials." *Drying technology* 23, no. 1-2 (2005): 305-15.
- [26] Taheri-Garavand, Amin, Shahin Rafiee, and Alireza Keyhani. "Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions." *International Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies* 2, no. 2 (2011).
- [27] Roberts, John S, David R Kidd, and Olga Padilla-Zakour. "Drying Kinetics of Grape Seeds." *Journal of Food Engineering* 89, no. 4 (2008): 460-65.
- [28] Toğrul, İnci Türk, and Dursun Pehlivan. "Modelling of Drying Kinetics of Single Apricot." *Journal of Food Engineering* 58, no. 1 (2003): 23-32.
- [29] A.R., Martins. "Avaliação Da Humidificação E Secagem Da Superfície Exterior Dos Sistemas Do Tipo Etics ". (2011).
- [30] Hii, CL, CL Law, and M Cloke. "Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Cocoa Beans During Artificial and Natural Drying." *Journal of Engineering Science and Technology* 3, no. 1 (2008): 1-10.
- [31] Guiné, Raquel. "Analysis of the Drying Kinetics of S. Bartolomeu Pears for Different Drying Systems." (2010).
- [32] Ketelaars, AAJ, Leo Pel, WJ Coumans, and PJAM Kerkhof. "Drying Kinetics: A Comparison of Diffusion Coefficients from Moisture Concentration Profiles and Drying Curves." *Chemical engineering science* 50, no. 7 (1995): 1187-91.
- [33] Toğrul, Hasan. "Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot." *Journal of food engineering* 77, no. 3 (2006): 610-19.
- [34] Sayed, Mohammed Atif. "Prediction of Drying Kinetics of Different Vegetables in a Fluidized Bed Drier." (2010).
- [35] "Http://Www.Infopedia.Pt/\$Energia-De-Activacao."
- [36] Planinić, Mirela Velić, Darko Tomas, Srećko Bilić, Mate Bucić, Ana "Modelling of drying and rehydration of carrots using Peleg's model" (2005)

- [37] Narayanan, N, and K Ramamurthy. "Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review." *Cement and Concrete Composites* 22, no. 5 (2000): 321-29.
- [38] "[Http://Www.Claybrick.Org/Content/Properties-Clay-Brick](http://Www.Claybrick.Org/Content/Properties-Clay-Brick)."
- [39] Künzeli, Hartwig M, and KURT KIESSL. "Calculation of Heat and Moisture Transfer in Exposed Building Components." *International Journal of heat and mass transfer* 40, no. 1 (1996): 159-67.
- [40] Derdour, L., H. Desmorieux, and J. Andrieu. "A Contribution to the Characteristic Drying Curve Concept: Application to the Drying of Plaster." *Drying Technology* 18, no. 1-2 (2000): 237-60.
- [41] Dietla, Christian, Edgar RF Winter, and Raymond Viskanta. "An Efficient Simulation of the Heat and Mass Transfer Processes During Drying of Capillary Porous, Hygroscopic Materials." *International journal of heat and mass transfer* 41, no. 22 (1998): 3611-25.
- [42] Efremov, Guerman I. "Drying Kinetics Derived from Diffusion Equation with Flux-Type Boundary Conditions." *Drying Technology* 20, no. 1 (2002): 55-66.
- [43] Jerman, Milo, Martin Keppert, Jaroslav Vyborny, and Robert Cerny. "Hygric, Thermal and Durability Properties of Autoclaved Aerated Concrete." *Construction and Building Materials* 41 (2013): 352-59.
- [44] Malab, S., A. Benaissa, S. E. Boudraa, and S. Aggoun. "Drying Kinetics of Self-Compacting Concrete." *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 33, no. 2 (2009): 135-45.
- [45] Pel, Leo, Klaas Kopinga, and H Brocken. *Moisture Transport in Porous Building Materials*. Technische Universiteit Eindhoven, 1995.
- [46] Zaknounge, A., P. Glouannec, and P. Salagnac. "Estimation of Moisture Transport Coefficients in Porous Materials Using Experimental Drying Kinetics." *Heat and Mass Transfer* 48, no. 2 (02/ 2012): 205-15.